

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 специальности 1.6.8. – «Гляциология и криология Земли»

Актуальность темы. Природные палеоархивы являются основными источниками важной разносторонней палеогеографической информации. Среди природных палеоархивов особое положение занимают снежно-фирново-ледяные керны высокогорных и полярных ледников, которые наряду с информацией о палеоклиматических изменениях нашей планеты содержат данные о газовом составе атмосферы в прошлом. Послойный анализ снежно-фирново-ледяных кернов позволяет реконструировать изменения большого набора экологических и климатических параметров (температура воздуха, количество осадков, атмосферная циркуляция, солнечная и вулканическая активность и др.) в масштабах от 10^{-1} до 10^5 лет. Важность послойных реконструкций данных параметров заключается в том, что полученные реконструкции могут быть использованы не только для понимания климатических и экологических изменений в прошлом, но также могут быть успешно использованы для оценки вклада современного антропогенного воздействия на объекты окружающей среды и прогноза масштаба будущих экологических и климатических изменений. Особое значение палеоархивные исследования имеют для Антарктического ледяного щита, т.к. его поведение в связи с глобальным потеплением имеет решающее значение для прогнозирования скорости повышения уровня мирового океана.

В связи с этим диссертационная работа А.А. Екайкина, целью которой является установление закономерностей формирования климатического сигнала изотопного состава снежно-фирново-ледяных кернов Центральной Антарктиды для реконструкции современных и ретроспективных глобальных климатических изменений, является весьма актуальной и имеющей большое практическое применение.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург.

Диссертационная работа состоит из введения, 9 глав, заключения, выводов, списка терминов, списка сокращений, списка цитируемой литературы из 356 источников и двух приложений. Диссертация изложена на 385 страницах машинописного текста, включающего 57 рисунков и 3 таблицы. По материалам диссертации опубликовано 49 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, базы цитирования Scopus и Web of Science.

Во введении диссертации обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и степень разработанности темы исследования, показана теоретическая и практическая значимость результатов исследования, сформулированы защищаемые положения, обоснована степень достоверности полученных научных результатов, определен личный вклад автора.

В первой главе диссертации, озаглавленной «Постановка проблемы», рассмотрены теоретические основы метода изотопно-температурного исследования ледяных кернов и возможности его использования в качестве источника информации о климате позднего плейстоцена и голоцена, а также всесторонне проанализированы основные погрешности и ограничения использования этого метода для исследования ледяных кернов. В конце главы делается вывод о том, что изотопно-температурный метод по данным снежно-фирновых и ледяных кернов позволяет реконструировать (как минимум качественно) изменения температуры в прошлом, однако присущие этому методу погрешности и ограничения, позволили автору сформулировать ряд задач, решению которых и посвящена данная диссертационная работа.

Во второй главе «Теоретические представления о формировании изотопного состава атмосферных осадков в Центральной Антарктиде» наряду с обзором основных понятий и определений изотопной геохимии для системы «источник влаги - водяной пар – атмосферные выпадения», изложена теория изотопно-температурного метода и дан критический анализ существующих принципов изотопного моделирования. Подробно рассмотрены существующие теории и модели формирования изотопного состава атмосферных осадков и обоснована усовершенствованная автором модель формирования изотопного состава осадков в Центральной Антарктиде, включающая геохимический цикл кислорода 17.

Третья глава «Изотопный состав осадков на станции Восток» посвящена изучению изотопного состава атмосферных осадков, выпадавших

на станции Восток в период с декабря 1998 г. по январь 2022 г. За изучаемый временной период на станции Восток“ на событийной основе” было отобрано, а затем с помощью изотопного лазерного анализатора воды проанализировано 479 проб осадков, охватывающих три полных годовых цикла (2000, 2017 и 2020 гг.) и несколько летних сезонов. Результаты показали, что изотопный состав всех видов осадков (осадки из облаков, ледяные иглы, изморозь) имеет ярко выраженный сезонный ход, изотопно-температурная зависимость которого составляет 0,33-0,45 ‰/°C для $\delta^{18}\text{O}$, что оказалось существенно меньше коэффициента регрессии между изотопным составом слоев поверхностного снега и среднегодовой температурой конденсации при их выпадении. Это отличие автор объясняет разницей между годовыми ходами температуры конденсации и приземной температурой воздуха. При этом изучение сезонных различий между изотопным составом осадков и приземной температурой показало, что изотопно-температурный градиент изменяется от 0,21 ‰/°C в зимний период до 0,66 ‰/°C в летний. Достоверность полученных данных подтверждается их соответствием результатам, полученным японскими учеными на станции Купол Фуджи и французскими учеными на станции Конкордия. В данной главе также приводятся результаты исследования изменчивости в осадках изотопных параметров второго порядка dxs и $^{17}\text{O}\text{-xs}$, которые позволили сделать заключение о том, что годовой ход этих параметров объясняется изменениями условий как в источнике исходной влаги, так и в районе ее выпадения на станции Восток. На основе представленных в данной главе результатов делается вывод, что формирование изотопного состава осадков, выпадающих в Центральной Антарктиде, происходит в соответствии с изотопной теорией, а изотопный состав снежно-фирново-ледяных отложений можно использовать в качестве палеотермометра.

Последующие три главы диссертации (четвертая, пятая, и шестая) посвящены изучению факторов, влияющих на формирование и постседиментационные изменения изотопного состава снежно-фирново-ледяной толщи в Центральной Антарктиде.

В четвертой главе подробно рассматривается влияние «депозиционного шума» на «полезный» сигнал изотопно-температурной зависимости в снежно-фирново-ледяных толщах. Возникновение «депозиционного шума» в процессе накопления снега на поверхности снежной толщи связано с ветровым снегопереносом и микрорельефом местности, поэтому в данной главе подробно рассмотрены особенности данных процессов в изучаемом регионе. Для оценки вклада шума, как в годовой прирост снега, так и в общий сигнал изотопных значений снежно-

фирново-ледяных толщ, формируемых в Центральной Антарктиде, была использована методика попарной корреляции между индивидуальными параллельными рядами данных с вычислением их среднего коэффициента корреляции. Так, анализ многочисленного фактического материала, полученного на снегомерных полигонах ст. Восток по годовому приросту снега, показал, что около 96% дисперсии годового снегонакопления приходится на «депозиционный шум», и только 4% на «полезный» сигнал. Было также показано, что ложный (неклиматический) сигнал во временных рядах снегонакопления в районе ст. Восток связан с образованием мегадюн, скорость смещения которых по поверхности снежной толщи составляет $4,6 \pm 1,1$ м/год, и все это («депозиционный шум» и неклиматический сигнал) в той же пропорции сказывается на величину изотопного сигнала снега в его временных рядах. При этом на величину изотопного сигнала снега в качестве дополнительного шума добавляется неравномерность распределения осадков по поверхности в зимнее и летнее время года. Было показано, что размахи варьирования изотопного состава в 10-ти см поверхностном слое снега и в шурфах (0-300 см) по δD были, хоть и значительны, но близки между собой, но существенно отличались от размаха варьирования изотопного состава атмосферных осадков. В конце главы делается заключение, что, благодаря плоской поверхности ледника и небольшого его уклона, район станции Восток является достаточно удачным местоположением для изучения климатического сигнала по изотопному составу снежно-фирново-ледяных кернов. Однако, существующие условия формирования изотопного состава снежно-фирново-ледяных кернов в этом районе позволяют по одному отобранному керну выполнить палеореконструкцию климатических данных лишь с разрешением порядка 10^2 - 10^3 лет.

Пятая глава диссертации посвящена изучению процессов, определяющих постдепозиционные изменения изотопного состава снежной толщи. Результаты, представленные в этой главе, основаны на данных мониторинга изотопного состава поверхностного слоя снежной толщи и водяного пара, влажности приземного слоя воздуха в районе ст. Восток, а также лабораторных экспериментов и анализа научной литературы. При сравнении изотопного состава снега в сводном ряду снежных шурфов и кернов с изотопными данными формирующих их атмосферных осадков было установлено, что отложенный снег обогащён тяжелыми изотопами (в среднем на $18,6 \pm 4,2$ ‰ по δD) относительно их среднегодового содержания в осадках, что связано с протеканием постдепозиционных процессов сублимации-ресублимации в поверхностном слое снежного покрова, которые изменяют не только изотопный состав осадков, но и соотношение в них

концентрацией дейтерия и кислорода 18. При этом изотопный состав годовых слоев, слагающих снежную толщу, лучше коррелирует с летней температурой воздуха (при сглаживании температурного ряда корреляция составляет 0,54), в то время как изотопный состав атмосферных осадков лучше коррелирует со средней годовой температурой воздуха.

Результаты лабораторных экспериментов, выполненных в специально сконструированной установке в Институте низких температур (ИНТ) Университета Хоккайдо (г. Саппоро, Япония), подтвердили, что постдепозиционные изменения изотопного состава снега действительно существует и заметны даже при низкой температуре (-35°C). В частности, было определено, что изменение $\Delta\delta D$ линейно коррелирует с температурой ($R = 0,70$) и скоростью сублимации ($R = 0,84$). Результаты изучения изменений изотопного состава (δD , d_{xs} и $^{17}\text{O-x}$ s) снега при экспозиции в полевых условиях гомогенизированного снежного образца размером $10 \times 10 \times 6$ см на станции Восток показали, что вследствие массообмена с атмосферой изотопный состав поверхностного 3-х см слоя стал изотопно тяжелее на 46 ‰ по δD (d_{xs} уменьшился на 12 ‰, а $^{17}\text{O-excess}$ увеличился на 20 per meg), в то время как в нижележащем 3-х см слое заметных изменений изотопного состава не наблюдалось. В отдельном разделе главы соискателем проводится подробное сравнение полученных им результатов по постдепозиционным изменениям изотопного состава снега в районе ст. Восток с результатами других исследователей, полученных для других районов Антарктиды и Гренландии. В конце главы подробно рассматриваются значение и возможности использования полученных результатов при интерпретации изотопных данных глубоких ледяных кернов.

В шестой главе выполнен обзор и проведено ранжирование второстепенных факторов, влияющих на формирование изотопного состава льда в слоях ледниковых кернов Западной Антарктиды. Среди второстепенных факторов подробно рассматриваются: сезонность и прерывистость осадков; условия в источнике влаги и смена источников влаги; стратосферная влага; соотношение между температурой конденсации и приземной температурой воздуха; изменение высоты поверхности ледника. Анализ возможного влияния второстепенных факторов позволил автору в конце главы сделать вывод, что помимо постдепозиционных процессов наибольшее влияние на климатическую запись изотопного состава в слоях ледниковых кернов в районе ст. Восток оказывает динамика поверхности ледника.

Седьмая глава посвящена обоснованию оптимальной методики построения изотопно-температурной калибровочной функции. При

критическом рассмотрении 5 независимых подходов к построению изотопно-температурной калибровочной функции соискатель приходит к выводу, что классический подход, основанный на использовании современной пространственной зависимости между изотопным составом снега и температурой, в первом приближении (с погрешностью 20-30 %) может быть пригоден в качестве калибровочной функции для глубоких кернов ст. Восток. Альтернативным подходом может быть также использование внутригодовой зависимости между изотопным составом осадков и температурой конденсации. Однако, часто используемая корреляция между изотопным составом снега и температурой воздуха по данным наблюдения близрасположенной метеостанции в данном регионе является ненадежным методом.

В восьмой главе приводятся некоторые примеры палеоклиматических реконструкций в различных масштабах времени (от 10^6 до 10^2 лет) на основе изотопно-температурного метода. Отмечается, что последовательность климатических событий и их причинно-следственная связь за последние 400-800 тыс. лет относительно неплохо изучена по данным ледяных кернов, отобранных в Антарктиде на станциях Конкордия, Купол Фуджи и Восток. По результатам детального анализа изотопного состава керна 5Г-1, отобранного на ст. Восток, в интервале глубины 3200-3400 м была предпринята попытка детального изучения хода температуры в МИС 11. При использовании трех изотопных соотношений (δD , $\delta^{18}O$ и $\delta^{17}O$) и модернизированного метода К. Куфи и Ф. Вимё соискателем с коллегами для этой эпохи были реконструированные ряды палеоклиматических характеристик - температура воздуха в районе ст. Восток и ΔSST в источнике влаги. Реконструкция климата в районе ст. Восток за последние 2200 лет была выполнена под руководством соискателя по результатам геохимических исследований трёх фирновых кернов с использованием простой изотопной модели, включающей модуль решения обратной задачи.

В заключительной девятой главе диссертации, включающей критический обзор всех предшествующих глав, сформулировано 10 основных пробелов в знаниях, которые, по мнению автора, существенно лимитируют понимание процессов формирования климатического сигнала изотопного состава ледяных отложений. Среди сформулированных пробелов, на устранение которых автор в будущем планирует обратить свое внимание, особое место занимает отсутствие надежной физической модели постдепозиционных изотопных изменений. В этой связи, хочется пожелать автору успехов в решении актуальных задач в его будущих научных исследованиях.

Научная новизна работы заключается в том, что с помощью современных методов и научных подходов был изучен весь комплекс процессов, формирующих климатический сигнал изотопного состава снежно-фирново-ледяной толщи в Центральной Антарктиде, а также определены основные факторы, влияющие на эти процессы. Впервые в российской практике была разработана модель изотопного состава осадков, включающая геохимический цикл кислорода 17, а для палеоклиматических реконструкций использованы сразу три изотопных параметра (концентрация дейтерия/кислорода 18, эксцесс дейтерия и эксцесс кислорода 17). На основе результатов изучения постдепозиционных изменений изотопного состава снега в снежном покрове сделан вывод о том, что изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, δD) снежной толщи в Центральной Антарктиде связан с летней температурой снега, а не со средней годовой температурой воздуха. Впервые показана роль крупных форм снежного рельефа в формировании не климатических вариаций изотопного состава снежной толщи. Отдельно следует отметить создание уникального банка данных об изотопном составе атмосферных осадков и пространственно-временном изменении прироста высоты снежной поверхности в районе станции Восток.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что модель изотопного состава, усовершенствованная соискателем и выложенная в свободном доступе на сайте ЛИКОС ААНИИ (www.cerl-aari.ru), может быть использована широким кругом специалистов, использующих изотопно-температурный метод в своих исследованиях. Результаты работы планируется использовать при подготовке магистерских курсов по изотопной геохимии, палеоклиматологии и гляциологии в Санкт-Петербургском государственном университете, а также для подготовки научно-популярных лекций для широкой аудитории. Но главное, полученные автором результаты будут максимально востребованы для будущих палеоклиматических реконструкций, в том числе при интерпретации ледяного керна возрастом до 1-1,5 млн лет, который будет получен в районе Купола В в рамках нового проекта Росгидромета в 2025 году.

Обоснованность положений, выносимых на защиту, и выводов по работе. Положения, выносимые на защиту, не вызывают сомнений, имеют научную новизну, обоснованы и экспериментально доказаны. Так, выводы 1 и 9 – подтверждают защищаемое положение 1, выводы 2 и 3 – положение 2, выводы 4 и 5 – положение 3, выводы 8-10 – положение 4, вывод 11 – положение 5. При этом заключение и выводы отвечают на вопросы, поставленные в цели и задачах исследования.

Степень достоверности результатов выполненной работы подтверждена большим объемом фактического материала и использованием современных инструментальных методов анализа, а также публикацией результатов исследования в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах. Правильность полученных результатов подтверждена сопоставлением полученных автором результатов с результатами, опубликованными ведущими в этой области знания исследователями мирового уровня.

Оформление диссертации соответствует установленным требованиям; работа достаточно логично изложена научным языком и аккуратно оформлена.

Автореферат диссертации изложен на 54 страницах, полностью отражает содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии установленным требованиям.

Несмотря на то, что в настоящей работе выполнен большой объем разноплановых работ, а полученные данные и их интерпретация позволили обосновать ряд новых научных положений по механизму формирования климатического сигнала изотопного состава снежно-фирново-ледяных отложений Центральной Антарктиды, по материалу диссертации имеется ряд замечаний.

1. Основное замечание сводится к тому, что несмотря на то, что в гляциологии общепринято отдельно рассматривать прирост высоты снежного покрова и изменение плотности снега в этих вновь образованных слоях, но в контексте данной диссертационной работы изучение прироста высоты снежного покрова лучше сразу было проводить в мм водного эквивалента. В этом случае не пришлось бы, например, в разделе 4.1.5 диссертации перебирать возможные причины пониженного снегонакопления на снегомерных полигонах ст. Восток в теплый период 1970-2019 гг., да и в разделах других глав, связанных с изучением динамики изотопного состава снежных толщ, было бы легче интерпретировать полученные в ходе мониторинговых работ данные.
2. На мой взгляд, раздел 2.1, включающий теоретические основы изотопно-температурного метода, из главы 2 более логично было бы перенести в самое начало первой главы. А то в Вашем случае получается, что уже после постановки проблемы Вы вдруг приводите основные понятия и описываете известные в литературе закономерности формирования изотопного состава атмосферной влаги и атмосферных осадков. Кроме того, при переносе раздела 2.1 в главу 1 обе главы литературного обзора были бы сопоставимы между собой по объему.

3. Из раздела 4.2.2 четвертой главы не понятно с чем сравнивали средние значения δD и d_{xs} в поверхностном снеге и шурфах - со средними или средневзвешенными их значениями в атмосферных осадках? Так, на стр. 140 указывается, что $(-447 \pm 13 \text{ ‰})$ и $(15,6 \pm 2,0 \text{ ‰})$ – это **среднее годовые** значения δD и d_{xs} в осадках, а на стр. 141 указывается, что средние и медианные значения в шурфах сравнивали со **средневзвешенным** изотопным составом атмосферных осадков. Однако, в разделе 5.3 следующей главы уже однозначно указывается, что изотопный состав снежной толщи сравнивался со среднегодовым значением изотопного состава атмосферных осадков. Поясните, пожалуйста, почему Вы сравнивали изотопный состав верхних слоев снежной толщи со среднегодовым, а не со средневзвешенным (по количеству осадков) годовым значением изотопного состава атмосферных осадков? Ведь некоторое утяжеление изотопного состава снега в снежной толще относительно среднегодовых значений осадков вполне закономерно, и его объяснять постседиментационными факторами, возможно, и не надо было, а вот отличия от средневзвешенных за год значений требуют таких последующих объяснений.
4. По моему мнению, голословным является утверждение на стр. 162 (2-й абзац сверху), что нахождение δD и d_{xs} в поверхностном слое снега в противофазе в период без осадков свидетельствует о кинетических процессах в ходе изотопного обмена между снежной толщей и атмосферой. Например, аналогичная ситуация может наблюдаться, когда выпавшие атмосферные осадки в последующие дни могли просто сохранить эту обратную зависимость между δD и d_{xs} .
5. Для «чистоты эксперимента» и удобства восприятия результаты изучения закономерностей изменения изотопного состава водяного пара лучше было бы показывать на примере δD , как это сделано в случае осадков и снежной толщи, а не на примере $\delta^{18}O$ (рис. 5.6), или лучше наоборот, все результаты по изотопному составу представлять на примере $\delta^{18}O$.
6. Меня не убедило объяснение соискателя, почему он отказался от отдельной главы, в которой были бы представлены и кратко описаны используемые в работе методы, методики и научное оборудование. Возможно, отдельную главу этому посвящать и не надо было, но раздел, в котором в одном месте были бы указаны все используемые в работе методики (от отбора проб, пробоподготовки, инструментального анализа полученных образцов, обработки и интерпретации полученных данных) и даны характеристики используемого в работе научного оборудования, привести стоило. Этот раздел позволил бы читателю в целом понять масштаб и уровень

выполненных в диссертации работ, а не составлять мозаику относительно используемых в работе методов из разных глав.

7. И в диссертации, и в автореферате вместо общепринятого научного понятия «давление насыщенного пара» используется жаргонное словосочетание «давление насыщения» (см., например, начало 2-го параграфа сверху на стр. 14 автореферата). А вместо общепринятого в аналитической химии термина «определение» изотопного состава пробы используется термин «измерение» изотопного состава пробы (см., например на стр. 138 диссертации), хотя на самом деле измеряется сигнал прибора и по нему уже определяется состав пробы.
8. В тексте диссертации и автореферата, хоть и редко, но встречаются неточности и описки. Например, на рисунке 4.2а не приведена цветная линия, отражающая распределение ежемесячных аномалий прироста высоты снежного покрова; на рис. 5.10 не указано, какого цвета профиль соответствует мини-шурфу МР2, а какой МР6; в определении SEM (стр. 288 диссертации) допущена ошибка и указано, что среднеквадратическое отклонение должно делиться на количество значений, а не на корень из числа этих значений; на стр. 127 утверждается, что «при увеличении количества вех с 1 до 10 SEM быстро уменьшается в 3,5», хотя в этом случае уменьшение SEM будет только в 3,2 раза.

Сделанные замечания не являются принципиальными, порой носят дискуссионный характер, и ни в коей мере не снижают общей положительной оценки диссертации. В работе выполнен очень большой объем экспедиционных, экспериментальных и химико-аналитических работ, интерпретация которых при грамотном использовании теоретических основ и литературных данных подтверждает обоснованность сделанных автором выводов и свидетельствует о высоком научном уровне представленной к защите работы.

Заключение

Диссертационная работа Екайкина Алексея Анатольевича «Формирование климатического сигнала изотопного состава ледяных отложений Центральной Антарктиды» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой на основании выполненных автором исследований предложены новые научно обоснованные решения, которые можно квалифицировать как крупное научное достижение в области изучения закономерностей формирования изотопно-климатического сигнала в снежно-фирново-ледяных кернах.

По объему, актуальности, уровню научных и практических результатов представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.6.8. – «Гляциология и криология Земли», а именно, его п. 4 «Реконструкция палеоклиматических событий различными методами, в том числе – на основе изучения в толщах ледников ледниковых кернов». Представленная работа полностью соответствует требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Екайкин Алексей Анатольевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора географических наук по специальности 1.6.8. – «Гляциология и криология Земли».

Начальник Химико-аналитического
центра ФГБУН Институт водных и экологических
проблем Сибирского отделения РАН
Доктор химических наук по специальности
02.00.02 – «Аналитическая химия» и 03.00.16 – «Экология»,

Папина Татьяна Савельевна

19.10.2024

Я, Папина Татьяна Савельевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Место работы: ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН
адрес: 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1
телефон/факс: +7(3852)666442; e-mail: papina@iwep.ru

Подпись Папиной Т.С. заверяю
Ученый секретарь ФГБУН
Институт водных и экологических
проблем СО РАН, к.ф.-м.н.



Трошкин Д.Н.