

**ЛИМНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК
(ЛИН СО РАН)**

Улан-Баторская ул., д. 3, а/я 278, г. Иркутск, 664033, Тел./факс (3952) 42-65-04/(3952) 42-54-05, e-mail: info@lin.irk.ru; [www: http://lin.irk.ru](http://lin.irk.ru),
ОКПО 03533748; ОГРН 1023801757540; ИНН/КПП 3811014433/381201001

«УТВЕРЖДАЮ»

директор ЛИН СО РАН

д.г.м.и. А.П. Федотов

26 сентября 2023г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Козачек Анны Владимировны

**«Закономерности формирования изотопного сигнала в ледниковых
кернах Эльбруса»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата

**географических наук по специальности 1.6.8 — Гляциология и криология
Земли.**

1. Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа А.В. Козачек посвящена исследованию изменения климата в высокогорной области Большого Кавказа по данным изучения изотопного состава ледниковых кернов Эльбруса и Казбека, в которой рассматриваются закономерности формирования климатического сигнала в кернах, определяются возможности и ограничения применения данных об изотопном составе для палеоклиматических реконструкций.

Ледниковые керны выгодно отличаются от других источников данных о прошлых изменениях климата тем, что одновременно дают информацию о нескольких параметрах окружающей среды: температуре воздуха, количестве атмосферных осадков, газовом составе атмосферы. Керны горных ледников содержат информацию об изменении климата в высокогорных областях, где сеть

метеорологических наблюдений недостаточна и ограничена малыми временными отрезками. За счёт высокого снегонакопления керны горных ледников позволяют изучать климатические изменения с высоким разрешением – годовым и сезонным. Кроме того, они включают в себе данные об изменении климата на территориях близких к местам проживания людей, что позволяет более точно оценить степень антропогенного воздействия на климатические изменения.

Актуальность работы заключается в том, что она вносит значимый вклад в изучение изменения климата за счет развития метода палеоклиматических реконструкций, основанного на изотопных исследованиях ледниковых кернов горных районов Кавказа, получении новых данных о прошлых изменениях климата на этих территориях. Временной период исследования в работе ограничен возрастом наиболее глубокого отобранного керна в высокогорной области на Западном плато Эльбруса и составляет два столетия (1816 – 2013 гг.). Дополнительно для анализа в работе использованы данные метеорологических наблюдений в регионе, в том числе Глобальной сети изотопов в осадках (GNIP), индексы атмосферной циркуляции, ранее опубликованные данные об изотопном составе ледников.

Тематика исследования, формулировка цели и задач исследования, используемые методы решения, область приложения полученных результатов указывают, что представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности **1.6.8 – Гляциология и криология Земли: п. 4 «Реконструкция палеоклиматических событий различными методами, в том числе – на основе изучения в толщах ледниковых кернов».**

2. Научная новизна работы состоит в том, что впервые выполнено детальное исследование изотопного состава керна глубокого бурения ледника на Западном плато Эльбруса и других ледниковых кернов в высокогорной области Кавказа, в результате которого:

1. Впервые установлена связь изотопного состава снега и льда на Эльбрусе с типом атмосферной циркуляции в Северном полушарии;

2. Впервые разработана методика реконструкции климатических параметров в высокогорных областях по данным об изотопном составе ледникового льда, определены возможности и ограничения её применения;

3. Реконструировано количество атмосферных осадков в высокогорной области Северного Кавказа за последние два столетия.

3. Значимость для науки и практики результатов, полученных автором диссертации

1. В работе получены новые уникальные данные об изотопном составе ледниковых кернов Северного Кавказа, которые включены в отечественные (свидетельство о государственной регистрации №2016621123 от 18.08.20) и международные (PAGES Iso2k) базы данных;

2. Разработанная методика палеоклиматической интерпретации изотопных данных может быть использована при исследовании ледниковых кернов в других горных районах мира;

3. Установленные закономерности формирования изотопного состава снега, фирна и льда и реконструкция количества осадков на Эльбрусе за последние 200 лет важны для уточнения и валидации климатических и изотопных моделей, которые используются для прогноза будущих климатических изменений;

4. Результаты работы использованы в отчетах по теме ЦНТП Росгидромета 1.5.6.2 «Исследование механизмов современных изменений климата и окружающей среды с использованием методов изотопного анализа атмосферных осадков и природных льдов».

4. Степень достоверности и обоснованности научных положений и выводов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием высокоточных изотопных данных, полученных с использованием современного аналитического оборудования, международных стандартов, межлабораторных сличительных испытаний (МСИ) с ведущими международными лабораториями в области изотопного анализа. Результаты находятся в соответствии с данными, полученными в других горных регионах мира. Обоснованность основных

выводов подтверждается публикациями в рецензируемых российских и международных периодических изданиях, обсуждением на конференциях, симпозиумах, семинарах. Автором опубликовано 20 научных работ в журналах, включенных в список ВАК, из них 11 входят в издания, индексируемые в системах Web of Science и Scopus. Зарегистрирован один патент и одна база данных. В опубликованных работах изложена основная часть материала, полученного в рамках диссертационного исследования.

5. Личный вклад автора

Автор выполнял пробоподготовку и изотопные измерения образцов льда в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) Арктического Антарктического научно-исследовательского института (г. Санкт-Петербург). Им проанализировано более 7000 образцов ледяных кернов, включая разработку методики измерений, а также последующую статистическую обработку полученных данных, анализ факторов, определяющих изотопный состав атмосферных осадков в регионе, реконструкцию изменений температуры воздуха и количества осадков, анализ климатических изменений как по данным метеонаблюдений, так и по результатам изотопного состава ледниковых кернов.

6. Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Полный объем диссертации включает 107 страниц текста, включая 43 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований.

Во введении обосновывается актуальность исследований, цель работы, ставятся задачи, излагается научная новизна и практическая значимость работы, формулируются защищаемые положения.

В первой главе содержится обзор литературы об изотопных исследованиях ледниковых кернов, показана история открытия изотопов кислорода и водорода, дано определение изотопного состава, приведена формула его расчета. Анализируется изотопный состав атмосферных осадков, гидрологический цикл воды и изменение его изотопного состава. Сделан обзор по применению изотопного метода при исследовании ледниковых кернов

высокогорных областей мира: ледников Альп, Анд, Гималаев, Алтая, обсуждается датирование кернов. Приведена историческая справка о первых исследованиях ледников Кавказа. На основе анализа опубликованных данных делается заключение о том, что исследования изотопного состава снега и льда следует проводить на больших высотах, где поверхностное таяние отсутствует или сведено к минимуму.

Во второй главе дается физико-географическая и климатическая характеристики района исследований, материалы и методы, применяемые в работе. Проведен анализ синоптических процессов, многолетних изменений температуры воздуха и количества осадков, описаны места бурения кернов, оледенение на Кавказе. Приводятся результаты об изотопном составе кернов, полученных на Западном плато Эльбруса в 2004, 2009, 2012, 2013 и 2018 гг., и на Казбеке в 2014 году, которые стали объектами изучения. Для анализа изотопного состава ледниковых кернов использована разработанная при участии автора методика, позволяющая измерять образцы с большей производительностью, чем рекомендованная производителем прибора Picarro L2120-i, применяемого в работе.

Показана калибровка прибора по международным стандартам МАГАТЭ, сделано межлабораторное сравнение данных с результатами, полученными в ведущих зарубежных лабораториях Франции и Австрии, специализирующихся на изотопном анализе. Приведен анализ образцов, с воспроизводимостью измерений 0,06‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,30‰ для δD , что вместе с результатами межлабораторного сравнения говорит о хорошем качестве и достоверности результатов, полученных в работе. Приводится сводный вертикальный профиль изотопного состава ледяных кернов Эльбруса и, по данным о плотности, глубины всех анализируемых кернов переведены в водный эквивалент. Показано, что на западном плато Эльбруса при измерении в полевых условиях температуры по всей глубине пробуренного ледника зафиксированы отрицательные температуры, что обеспечивает сохранность климатического сигнала в керне и говорит о репрезентативности полученных данных по изменению климата в прошлом в этом районе. Да-

тирование выполнялась методом подсчёта годовых слоёв, которые чётко выражены в колебаниях изотопного состава, средняя годовая амплитуда по $\delta^{18}\text{O}$ составляла 20‰. Для датирования кернов сезонный ход изотопного состава сопоставлялся с сезонным ходом температуры в регионе по данным метеорологических наблюдений на станциях Кавказа и данных Глобальной сети изотопов в осадках. Для выделения холодных и теплых периодов в керне использована методика, разработанная для гренландских кернов.

В третьей главе проведено исследование закономерностей формирования изотопного сигнала в ледниковых кернах Эльбруса. По результатам, взятым из Глобальной сети изотопов атмосферных осадков (GNIP), и данным изотопного сигнала четырнадцати ледниковых кернов из районов Эльбруса и Казбека проанализирована пространственная изменчивость изотопного состава осадков. По данным GNIP рассчитаны градиенты изотопного состава осадков. Средние значения изотопного состава кернов Казбека и Эльбруса совпали, что свидетельствует о репрезентативности данных, полученных на Западном плато Эльбруса для всего высокогорного региона Большого Кавказа. Для выявления факторов, влияющих на формирование изотопного состава атмосферных осадков, снега, фирна и льда на Кавказе, выполнялось сопоставление результатов об изотопном составе и скорости снегонакопления по керну с метеорологическими данными в регионе, индексами циркуляции атмосферы и результатами расчётов в климатических моделях для периода с 1914 по 2013 гг. Использовались данные метеонаблюдений по 13 станциям Кавказа и данные локальных метеорологических условий на Эльбрусе по автоматическим метеостанциям (АМС). Делается заключение по изотопному составу снега и льда на Эльбрусе в теплый и холодный периоды, приведены основные факторы, контролирующие изотопный состав осадков в высокогорной области Большого Кавказа.

В четвертой главе обсуждаются реконструкции изменений температуры воздуха на Кавказе за последние столетия. Большая аккумуляция снега на Западном плато (1400 мм в.э.) и детальность пробоотбора позволили разделить фирно-

ледовую толщину на летние и зимние слои, начиная с 1774 г. Слои отдельных годовых горизонтов с учетом плотности снежно-фирновой толщи и разработанной и апробированной модели течения льда были пересчитаны в значения водного эквивалента каждого годового слоя на поверхности ледника. Построенная хронологическая шкала позволила восстановить данные по аккумуляции с точностью до 1 года за 2009 – 1912 гг., что хорошо согласуется с изотопными данными. Интерпретация результатов реконструкции аккумуляции выполнена при сравнении с метеорологической информацией за период инструментальных наблюдений. Реконструировано изменение количества атмосферных осадков к югу от Главного Кавказского хребта за последние 200 лет (1816 – 2013 гг.). Делается заключение, о том, количество осадков в районе исследования в последние десятилетия увеличилось, что отражает глобальную тенденцию, связанную с общим потеплением климата.

Замечания по диссертационной работе

В работе сделаны замечания, которые в основном сводятся к неточностям или отсутствию обозначений в рисунках и таблицах. Есть вопросы по терминологии и к некоторым формулировкам по тексту диссертации.

1. Для реконструкции температуры были использованы данные станции Терскол, расположенной на 3 км ниже точки бурения на Эльбурсе. Не пробовал ли автор использовать данные реанализов для уровней свободной атмосферы наиболее приближенных к вершине Эльбурса (например, изобарической поверхности 500 мб). Тем более, что на стр. 44 автором подтверждается обоснованность использования данных реанализа для оценки климатической изменчивости.

2. В работе констатируется: «В теплый период наблюдается резкое изменение типа циркуляции в 1984 году». Необходимо было дать пояснение по резкому изменению циркуляции в это время.

3. Не совсем понятна фраза на стр. 32 главы 2 «Континентальность климата увеличивается с востока на запад»? Тем более, что далее в этом же абзаце

сказано, что граница питания ледников в западной части этого региона лежит ниже, чем на востоке.

4. В работе не указано для какого количества проб рассчитывались коэффициенты корреляции (таблицы 6, 7 стр. 68, 72. Глава 3). Можно ли считать, что коэффициенты 0,25-0,27 значимы? На стр. 72 обсуждается отрицательная корреляция между скоростью снегонакопления и индексом NAO ($r = -0.18$), однако это значение не указано в таблице 7.

5. В некоторых рисунках не подписаны оси координат, не указаны размерности (рисунок 7, 11, 37, 41).

6. Подпись к рисунку 28 на стр. 63. «Льда, отложенного...». Учитывая механизм льдообразования на Эльбрусе лучше использовать «льда, образованного (сформированного)...» (тоже замечание к подписям в рисунках 31 и 35).

7. Стр. 64. Высотный градиент изотопного состава осадков рассчитывался по данным 3-х метеостанций (GNIP, таблица 2, рисунок 9), однако все эти станции расположены намного южнее Главного Кавказского хребта (Малый Кавказ). Насколько репрезентативны эти данные для Эльбруса и Казбека?

Сделанные замечания не снижают достоинство диссертационной работы А.В. Козачек, ее основные положения достаточно полно раскрыты в публикациях. Диссертация выполнена на высоком научном и методическом уровне, полученные автором результаты имеют практическое значение. Текст написан доступным языком в ясном и лаконичном научном стиле. В каждой главе сформулированы выводы, обоснованные фактическим материалом. В конце диссертации сделано общее Заключение, обобщающее основные этапы выполнения работ, цель и решения поставленных задач. Автореферат полностью отражает содержание и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа А. В. Козачек представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой автор показал высокий профессиональный уровень как специалист в области гляциологии и криологии земли при реконструкция палеоклиматических событий в толщах ледниковых кернов высокогорных районов Кавказа. Выполненное исследование

соответствует специальности ВАК Минобрнауки России: 1.6.8 – Гляциология и криология Земли: п. 4 «Реконструкция палеоклиматических событий различными методами, в том числе – на основе изучения в толщах ледников ледниковых кернов».

Диссертационное исследование на тему «Закономерности формирования изотопного сигнала в ледниковых кернах Эльбруса» соответствует критериям, установленным в пп. 9-11, 13 и 14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Козачек Анна Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.8 – Гляциология и криология Земли.

Отзыв на диссертацию А.В. Козачек обсужден на заседании объединенного семинара Лимнологического института СО РАН (протокол № 3 от 25.09. 2023 г.) и принят в качестве официального отзыва ведущей организации.

Отзыв подготовили:

Д.г.н., г.н.с, проф. лаборатории
гидрохимии и химии атмосферы

Т.В. Ходжер

К.г.н., с.н.с., лаборатории
геологии оз. Байкал

Э.Ю. Осипов

К.г-м.н., н. с.,
лаборатории междисциплинарных
эколого-экономических
исследований и технологий

О.Г. Степанова

Подпись Т.В. Ходжер , Э.Ю. Осипова, О.Г.Степановой
заверяю

Ученый секретарь Института, к.б.н.

Н.В.Максимова

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук
(ЛИН СО РАН).

664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская,
д. 3, а/я 278.

телефон: (3952) 42-65-04

факс: (3952) 42-54-05

адрес электронной почты: info@lin.irk.ru