

ОТЗЫВ **официального оппонента**

на диссертацию Козачек Анны Владимировны «Закономерности формирования изотопного сигнала в ледниковых кервах Эльбруса», представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.8. – «Гляциология и криология Земли»

Диссертационная работа А.В. Козачек посвящена решению важной задачи современной гляциологии – реконструкции глобальных и региональных текущих и палеоклиматических изменений по данным послойного анализа высокогорных ледниковых кернов.

Актуальность темы. Природные палеоархивы являются ценными источниками информации о климате и состоянии природной среды в прошлом. Среди природных палеоархивов только высокогорные ледниковые керны позволяют одновременно получать ретроспективные данные по температуре приземного воздуха, количеству атмосферных осадков и газовому составу атмосферы с годовым и сезонным разрешением. Поэтому послойное изучение высокогорных ледниковых кернов представляет большой практический интерес одновременно для таких направлений науки, как гляциология, климатология, экология, гляциохимия. В этой связи, изучение изменения климата в высокогорной области Большого Кавказа по данным изотопного состава ледниковых кернов Эльбруса и Казбека представляет собой большой научный и практический интерес не только для Кавказского региона, но и вносит существенный вклад в дальнейшее развитие всего комплекса методов палеоклиматических реконструкций. Актуальность данной работы усиливает тот факт, что со стороны России изучение ледника Эльбрус наряду с ледником Белуха входит в программу международного проекта ЮНЕСКО «ICE MEMORY», который направлен на создание в Антарктиде уникального хранилища кернов льда, отобранных из ключевых исчезающих ледников мира, с целью их сохранения для будущих поколений.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержание работы изложено на 107 страницах машинописного текста, включающего 5 таблиц и 43 рисунка. Список литературы содержит 145 ссылок, в том числе более 80 – на зарубежные источники. Диссертация написана грамотным научным языком, хорошо структурирована и оформлена.

Во введении диссертации обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и степень разработки темы, показана практическая значимость результатов исследования, сформулированы защищаемые положения, представлена апробация научных результатов, определен личный вклад автора.

В первой главе приведен подробный литературный обзор, касающийся теоретических основ формирования и изучения изотопного состава воды атмосферных осадков и ледниковых толщ, а также существующих возможностей и ограничений при использовании изотопных данных ледниковых кернов для палеоклиматических исследований. В этой же главе дан критический анализ результатов, полученных при исследовании изотопного состава ледниковых кернов из горных областей различных регионов мира, на основании чего в конце главы делается вывод, что ледяные отложения на Западном плато Эльбруса могут быть использованы для реконструкции климатических изменений в прошлом.

Во второй главе «Материалы и методы» дана подробная характеристика района исследования, которая включает описание его местоположения, природных и климатических особенностей, приведено подробное описание ландшафтных и климатических особенностей оледенения в системе Большого Кавказа и конкретных мест бурения и отбора образцов ледниковых кернов. Подробно описаны условия проведения буровых работ по отбору 181,8 м ледового керна на Западном плато Эльбруса осенью 2009 г., которые были продолжены в той же точке в 2012 и 2013 гг., а также кернов на плато Майли на Казбеке и Восточной вершине Эльбруса. Приведены профили значений измеренных во время полевых работ температур в скважинах и плотности льда отобранных кернов, а также проведено сравнение климатических данных,

полученных на 16 метеостанциях Кавказа, которые в дальнейшем использованы в диссертационной работе для анализа закономерностей формирования изотопного состава осадков на Эльбрусе. В главе также описаны циркуляционные индексы Северного полушария (NAO, AO, NCP), влияющие на изотопный состав осадков в изучаемом регионе; приведены данные годового хода $\delta^{18}\text{O}$ и дейтериевого эксцесса в осадках метеостанций Кавказа, включенных в GNIP (глобальная сеть изотопов в осадках), и годового хода приземных температур, полученных в период с января 2019 года по ноябрь 2021 г. с помощью автоматических метеостанций, расположенных на разных высотах в районе поляны Азау. Все эти данные в дальнейшем были использованы для сравнения и верификации полученных автором изотопных данных для ледяных кернов. Очень подробно в главе представлены описание используемого в работе метода изотопного анализа состава воды, принцип работы оборудования и методика выполнения всего комплекса лабораторных работ, а также методика оценки скорости снегонакопления по толщине годовых и сезонных слоёв с учётом поправок на уплотнение и растекание и методика датирования слоев. Проведено сопоставление данных изотопного состава четырёх кернов, полученных на Западном плато Эльбруса в 2004, 2009- 2013 и 2018 гг., а также на Казбеке в 2014 г., которое позволило составить единый сводный вертикальный профиль изотопного состава кернов льда и объяснить возможные причины расхождения данных между сравниваемыми кернами. Показано, что на Западном плато Эльбруса (до глубины 168,6 м) сохраняется сезонный сигнал в изотопном составе ледяных отложений, который позволяет оценить увеличение температуры воздуха на Кавказе, начавшееся позже, чем в других регионах.

В третьей главе изучаются закономерности многолетнего изменения изотопного состава снега и льда на Кавказе и влияние на эти закономерности различных факторов: метеорологических показателей, индексов циркуляции атмосферы, постдепозиционных эффектов. Для исследования связи между изотопным составом ледникового льда на Западном плато Эльбруса и изотопным составом формирующих его атмосферных осадков были проанализированы зависимости изменчивости изотопного состава льда и атмосферных осадков на четырех станциях, включенных в международную сеть GNIP и максимально

приближенных к Кавказу. Результаты этого исследования показали, что скорость снегонакопления в точке бурения может быть использована для реконструкции изменения количества осадков в регионе (причем, к югу от Кавказа во все сезоны) за период, когда данные метеонаблюдений отсутствуют. Большое внимание в главе было уделено изучению влияния региональных метеопараметров (температура воздуха и количество осадков) и индексов циркуляции атмосферы на изотопный состав льда, сформированный в теплый и холодный период года. Было показано, что наиболее тесная корреляционная связь наблюдалась между температурой воздуха на близко расположенных метеостанциях и изотопным составом ледяного эльбрусского керна в летний сезон относительно других периодов наблюдения. Это объясняется тем, что в летний период источник влаги более стабилен и расположен вблизи места выпадения осадков, в то время как в холодный сезон преобладают осадки, принесенные воздушными массами, сформированными над северной частью Атлантического океана и над Средиземным морем, поэтому изотопный состав в холодный период, в первую очередь, определяется типом циркуляции атмосферы. По данным изотопного состава отобранных и проанализированных соискателем проб были построены линии метеорных вод для всего количества осадков изучаемого региона и для теплого и холодного периодов отдельно, а также была рассчитана изотопно-температурная функция для периода значимых корреляций между температурой воздуха и изотопным составом льда. Показано, что влияние постдепозиционных эффектов на изменение изотопных составов снега, фирна и льда в изучаемом регионе незначительно.

Четвертая заключительная глава посвящена палеоклиматическим реконструкциям изменений количества атмосферных осадков и температуры приземного воздуха в различные сезоны года в Кавказском регионе за последние 200 лет. Выполненная соискателем реконструкция аккумуляции по глубинному Эльбрусскому керну показала, что основной вклад в годовую аккумуляцию на Западном плато Эльбруса вносят осадки теплого сезона, при этом результаты кернового бурения могут описывать поле годовых осадков с максимальной точностью в радиусе 10 – 50 км, а с приемлемой точностью в радиусе до 100 км от места бурения. По изучению корреляционных связей между реконструированным

количеством осадков и индексами циркуляции атмосферы было определено, что межгодовые вариации количества осадков к югу от Главного Кавказского хребта зависят от типа циркуляции атмосферы, в первую очередь, от значений индекса NAO – при индексе $NAO > 0$ на Эльбрус приходят более сухие воздушные массы, а при $NAO < 0$ поступают более влажные воздушные массы с Атлантики. Реконструированные за последние 200 лет количества осадков показали, что в изучаемом районе до 80-х – 90-х годов прошлого столетия рост среднего многолетнего количества осадков шел очень медленно, а в последние 30 лет он значительно ускорился. Для реконструкции температуры воздуха были использованы данные о зависимости изотопного состава атмосферных осадков, отобранных в Азау, изотопного состава ледяного керна и температуры воздуха на станции Терскол. Отсутствие тренда на повышение температур за последние 70 лет по данным обеих реконструкций соискатель объясняет тем, что на изотопный состав осадков в регионе, особенно в холодный период, влияет не только местная температура воздуха, но и тип циркуляции атмосферы.

В заключении диссертации подчеркнута актуальность направления исследований и востребованность полученных в работе результатов, приведены основные выводы, представленные в конце каждой из глав диссертации, и подводится итог, что предложенные соискателем подходы к интерпретации результатов изотопных исследований эльбрусского керна могут найти применение при изучении ледниковых кернов других горных районов.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые на Западном плато Эльбруса были отобраны глубинные ледниковые керны, результаты исследования которых позволили: 1) реконструировать изменения приземной температуры и количества атмосферных осадков в высокогорной области Северного Кавказа за последние 200 лет; 2) установить связь изотопного состава снега и льда на Эльбрусе с типом атмосферной циркуляции в Северном полушарии.

Практическая значимость работы состоит в том, что материалы данного исследования включены в отечественные и международные базы данных, а установленные закономерности формирования изотопных характеристик льда на

Эльбрусе и реконструкции количества осадков и приземной температуры могут служить исходной информацией для уточнения и валидации климатических и изотопных моделей, используемых для прогноза будущих климатических изменений в Кавказском регионе.

Обоснованность и степень достоверности результатов выполненной работы подтверждена большим объемом фактического материала и использованием современных инструментальных методов анализа, а также публикацией результатов исследования в высоко рейтинговых рецензируемых научных журналах. Правильность полученных результатов подтверждена использованием МАГАТЭ-стандартов изотопного состава воды для калибровки внутренних лабораторных стандартов, а также сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей в других горных регионах мира. Следует также отметить, что полученные автором среднесезонные данные об изменении изотопного состава атмосферных осадков на Западном плато Эльбруса за период с 1816 по 2013 гг. после независимой экспертной оценки были включены в международную базу данных изотопного состава атмосферных осадков, ледников, водоёмов и натёчных образований в пещерах PAGES Iso2ka.

Автореферат диссертации изложен на 23 страницах, полностью отражает содержание работы и оформлен в соответствии установленным требованиям. Основные защищаемые положения сформулированы и раскрыты. По результатам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 в зарубежных журналах, рекомендованных ВАК. Апробация работы проходила на 12 международных и российских конференциях в 2014-2022 гг. Заключение и выводы диссертационной работы отвечают на вопросы, поставленные в целях и задачах исследования. Хотелось бы также отметить научную грамотность, четкость и лаконичность изложения материала.

Несмотря на вышесказанное, по работе имеются ряд вопросов и замечаний:

1. На мой взгляд, для удобства восприятия материала самую большую по объему вторую главу можно было разбить на две главы, в одну из которых поместить всю информацию о районе, материалах и методе исследования, а в другую

свести все полученные результаты измерений, а также их анализ и сопоставление с исходными литературными данными.

2. В выводах ко второй главе не корректно говорить о разработке методики проведения изотопных исследований с использованием технологии WS-CRDS, в данном конкретном случае можно говорить лишь об адаптации существующей методики к вашим объектам исследования.
3. На стр. 64 утверждается, что средние значения изотопного состава кернов Казбека и Эльбруса совпадают, однако на рисунке 29 четко видно, что, начиная с глубины 7,5 метров, наблюдается существенное расхождение изотопных данных этих кернов. Чем это можно объяснить? И о каких средних значениях изотопного состава здесь идет речь?
4. Из рисунка 43 и из текста описания к нему (стр. 77-78 и 86-87) не понятно, каким образом была получена реконструкция среднегодовых температур на станции Терскол, которая затем сравнивается с реконструкцией по ледниковому керну?
5. В целом диссертация написана грамотным научным языком, но встречаются некоторые мелкие опечатки и неточности. Например, в подписи к рис.2 вместо «фазовых переходов» написано «фазовых переходах», а фамилия ученого Рэля написана через «е», а не через «э», как это принято в устоявшейся транскрипции написания фамилии этого ученого; некорректно говорить «возраст керна» (стр. 5, 2-й абзац сверху), лучше сказать «период формирования керна»; некорректна подпись к рисунку 43, на котором приводятся температурные реконструкции по керну и по осадкам на метеостанции Терскол, и др.

Указанные недостатки и замечания не умаляют достоинства и научную значимость представленного диссертационного исследования и не влияют на его положительную оценку.

Заключение

Диссертационная работа Козачек Анны Владимировны «Закономерности формирования изотопного сигнала в ледниковых кернах Эльбруса» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком

профессиональном уровне. Она обладает новизной и решает актуальные теоретические и практические задачи, связанные с закономерностью формирования изотопного состава ледяных отложений на Эльбрусе и возможностью реконструкции климатической информации в этом регионе за последние 200 лет. Автором выполнена большая по объему работа, имеющая как научную, так и практическую значимость и представляющая собой законченное самостоятельное исследование. Работа соответствует паспорту специальности ВАК 1.6.8. – «Гляциология и криология Земли» в пунктах 3-4, а также требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в пунктах 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Козачек Анна Владимировна несомненно заслуживает присуждения ей искомой ученой степени кандидата 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

22.09.2023

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

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



Трошкин Д.Н.