

На правах рукописи



**Козачек Анна Владимировна**

**Закономерности формирования изотопного сигнала в  
ледниковых кернах Эльбруса**

Специальность 1.6.8 —  
«Гляциология и криология Земли»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата географических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Институте географии Российской академии наук и в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте Росгидромета.

- Научный руководитель: доктор географических наук  
**Михаленко Владимир Николаевич**
- Официальные оппоненты: **Папина Татьяна Савельевна**,  
доктор химических наук, доцент,  
Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук,  
начальник химико-аналитического центра
- Петраков Дмитрий Александрович**,  
кандидат географических наук,  
кафедра криолитологии и гляциологии географического факультета Московского государственного университета,  
ведущий научный сотрудник
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г. в \_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.049.03 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Отзывы на автореферат (на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью и в электронном виде в формате PDF) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета 24.1.049.03, Титковой Т.Б. e-mail: [d00204604@igras.ru](mailto:d00204604@igras.ru)

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат географических наук

Титкова Т.Б.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Изменения климата, наблюдающиеся в последнее время, влияют на все природные процессы и на хозяйственную деятельность человека (IPCC, 2021). Основным источником знаний о современных климатических изменениях являются данные метеорологических наблюдений. Однако метеонаблюдения начались относительно недавно, например, достоверные ряды количества осадков на Кавказе доступны только с 1966 года до настоящего времени ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)), поэтому для получения климатических рядов, охватывающих периоды в несколько сотен лет и более, необходимо использовать косвенные данные о климатических вариациях. Информация о прошлых изменениях климата сохраняется во многих природных объектах, таких как годовые кольца деревьев, донные отложения морей и пресноводных водоёмов, ледниковые керны. Ледниковые керны выгодно отличаются от других источников данных о прошлых изменениях климата тем, что одновременно дают информацию о нескольких параметрах окружающей среды, в первую очередь — о температуре воздуха, количестве атмосферных осадков и газовом составе атмосферы. В результате исследований ледниковых кернов были получены уникальные данные о климатических изменениях в Антарктиде и Гренландии в далеком прошлом (Petit et al., 1999), (NEEM, 2013). Керны горных ледников содержат информацию об изменении климата в высокогорных областях, где до сих пор сеть метеорологических наблюдений разрежена или вовсе отсутствует. Такие керны охватывают меньшие промежутки времени по сравнению с кернами из полярных областей, однако позволяют изучать климатические изменения с годовым и даже сезонным разрешением за счёт более высокого снегонакопления. Кроме того, горные ледники заключают в себе данные об изменении климата на территориях близких к местам проживания людей, что позволяет более точно оценить степень антропогенного воздействия на климатические изменения на региональном уровне и получить информацию о загрязнении окружающей среды за счёт хозяйственной деятельности человека.

В условиях меняющегося климата динамика горных ледников определяется не только условиями на низких высотных уровнях, где происходит таяние, но и в высокогорных областях, где располагаются зоны аккумуляции ледников. Во многих работах показано, что климатические изменения на разных высотных уровнях могут отличаться в одной и той же горной системе (см. обзор в (EDW, 2015)). В связи с этим становится актуальным исследование климатических изменений в горных районах на всех высотных уровнях как инструментальными методами, так и с применением косвенных данных.

В настоящей работе рассматриваются изменения климата в высокогорной области Большого Кавказа по данным изучения изотопного состава ледниковых кернов Эльбруса и Казбека. Временной период исследования ограничен возрастом наиболее глубокого керна и составляет два столетия (1816 – 2013 гг.).

Дополнительно для анализа были 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. В работе рассматриваются закономерности формирования климатического сигнала в ледниковых кернах, полученных на Кавказе, определяются возможности и ограничения применения данных об изотопном составе ледяных отложений для палеоклиматических реконструкций. Актуальность работы заключается в том, что она вносит вклад в изучение изменений климата за счет дальнейшего развития метода палеоклиматических реконструкций, основанного на изотопных исследованиях ледниковых кернов из горных районов, и получения новых данных о прошлых (за последние 200 лет) изменениях климата в высокогорье Кавказа.

**Целью** данной работы является выявление закономерностей формирования изотопного состава кислорода ледниковых кернов Эльбруса как основы для реконструкций изменений климата в высокогорной области Северного Кавказа за последние 200 лет

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. получить экспериментальные данные об изотопном составе снега и льда и скорости аккумуляции на Западном плато Эльбруса;
2. выявить закономерности формирования климатического сигнала в ледниковой толще, определить возможности и ограничения применения изотопного метода для реконструкции прошлых изменений климата на Кавказе;
3. разработать методику реконструкции элементов климата, которые могут быть восстановлены по данным об изотопном составе ледниковой толщи на Западном плато Эльбруса;
4. реконструировать климатические изменения в высокогорной области Северного Кавказа по данным ледниковых кернов и сопоставить полученные палеоклиматические ряды с данными из других источников.

**Научная новизна:** Предыдущие палеоклиматические реконструкции, основанные на результатах исследования ледниковых кернов, были выполнены для Гренландии, Антарктиды и ряда горных районов. Для Кавказа подобные исследования ранее не проводились. В 2009 году впервые было выполнено глубокое бурение ледника в высокогорной области Кавказа – на Западном плато Эльбруса, в рекристаллизационной зоне льдообразования, где климатический сигнал во льду не нарушен летним таянием. Это сделало возможным проведение настоящего исследования, 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.

### **Практическая значимость**

- Полученные в ходе исследования данные об изотопном составе ледниковых кернов Северного Кавказа включены в отечественные (свидетельство о государственной регистрации №2016621123 от 18.08.200г) и международные (PAGES Iso2k ) базы данных;
- Разработанная методика палеоклиматической интерпретации изотопных данных может быть использована при исследовании ледниковых кернов из других горных районов;
- Установленные закономерности формирования изотопных характеристик льда и реконструкция количества осадков на Эльбрусе за последние 200 лет важны для уточнения и валидации климатических и изотопных моделей, которые, в свою очередь, используются для прогноза будущих климатических изменений.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Вариации  $\delta^{18}\text{O}$  в вертикальном разрезе ледниковой толщи на Западном плато Эльбруса отражают временные изменения изотопного состава атмосферных осадков Центрального Кавказа; изотопный состав атмосферных осадков в высокогорной области Большого Кавказа в основном контролируется синоптическими процессами, которые определяют адвекцию влаги с Чёрного моря или с Атлантики;
2. Связь изотопного состава с приземной температурой воздуха Северного Кавказа статистически незначима. Это говорит о том, что реконструкция температуры воздуха по эльбрусскому керну возможна только по результатам моделирования источников влаги, из которой формируются выпадающие на Эльбрусе осадки;
3. Изменение аккумуляции в точке бурения на Западном плато Эльбруса отражает режим увлажнения в радиусе 50 – 100 км;
4. Временная изменчивость аккумуляции на Западном плато хорошо согласуется с типичными периодами климатической изменчивости: переходу от малой ледниковой эпохи к современному состоянию (XIX – начало XX вв.), а также квази-декадной изменчивости, хорошо отражаемой индексами NAO и AMO.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием высокоточных изотопных данных. Результаты находятся в соответствии с

результатами, полученными другими авторами в других горных регионах. Обоснованность основных выводов подтверждается публикациями в рецензируемых периодических изданиях, обсуждением на конференциях и семинарах.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на международной школе наук об атмосфере (ERCA, Гренобль, Франция, 2013), международной конференции PAGES (Гоа, Индия, 2013), Ассамблее «Атмосфера и Криосфера» (Давос, Швейцария, 2013), Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле (EGU, Вена, Австрия, 2014, 2015, 2019), Международной конференции по палеоклимату и ледниковым кернам (IPICS, Хобарт, Австралия, 2016), научно-производственном совещании Северо-Кавказского УГМС (Гузерибль, 2014), гляциологическом симпозиуме «Роль снега и льда в природе и жизни людей» (Новосибирск, 2014), XVI гляциологическом симпозиуме (Санкт-Петербург, 2016), Всероссийской научной конференции «Итоги и перспективы изучения природной среды Российской Арктики и других полярных областей» (Сочи, 2015) на российско-французских семинарах «Ледниковые архивы данных о климате и окружающей среде» (Санкт-Петербург, 2013 и 2015; Гренобль, 2017), на научных семинарах Отдела географии полярных стран ААНИИ и Отдела гляциологии ИГ РАН. 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», которая выполнялась в ЛИКОС ААНИИ в 2014 – 2016 гг.

**Личный вклад.** Работа основана на изучении изотопного состава ледниковых кернов Эльбруса и Казбека. Автор непосредственно выполняла пробоподготовку и изотопные измерения образцов льда в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ (всего было проанализировано более 7000 образцов), 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 анализа изотопного состава ледниковых кернов.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 20 печатных работах, в журналах, рекомендованных ВАК, 11 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и/или Scopus. Зарегистрированы 1 патент и 1 база данных.

**Благодарности** Автор благодарит за помощь в работе над диссертацией научного руководителя В.Н.Михаленко и всех коллег из ИГ РАН и ААНИИ. Работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-05-31102 мол\_а, 17-05-00771 а, гранта РНФ 17-17-01270.

**Объем и структура работы** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 107 страниц текста, включая 43 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 145 наименования.

## Содержание работы

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

**Первая глава** посвящена обзору литературы об изотопных исследованиях ледников и ледниковых кернов. В этой главе приведены все термины, касающиеся изотопного состава. Изотопный состав определяется как относительная концентрация тяжёлых изотопов по сравнению со стандартом SMOW (Standard mean ocean water), который был разработан и в настоящее время поставляется Лабораторией изотопной гидрологии Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Изотопный состав рассчитывается по формуле 1.

$$\delta = \frac{R_{sample} - R_{standard}}{R_{standard}} \times 1000 \quad (1)$$

где  $R_{sample}$  — соотношение тяжёлых и лёгких изотопов в образце, а  $R_{standard}$  — соотношение тяжёлых и лёгких изотопов в стандарте.

Зависимость между концентрациями кислорода-18 и дейтерия в воде близка к линейной. Впервые эта зависимость была описана в работе (Friedman, 1953), и тогда же было предложено физическое объяснение этой зависимости. Она связана с корреляцией между парциальным давлением различных изотопологов воды во время образования облаков. Такие процессы как испарение и конденсация над поверхностью океана, перенос влаги, образовавшейся над континентом, должны оказывать влияние на линейную зависимость между  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  (Sharp, 2017).

В среднем, в атмосферных осадках соотношение между концентрацией дейтерия и кислорода-18 описывается уравнением  $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$  (Dansgaard, 1964). При фазовых переходах это соотношение может меняться. Для определения этих изменений, а также для интерпретации изотопного состава осадков используется параметр дейтериевый эксцесс (d-excess), который определяется по формуле 2.

$$d\text{-excess} = \delta D - 8 \times \delta^{18}O \quad (2)$$

Процесс формирования осадков начинается с испарения воды с поверхности океана. Поскольку давление насыщения для тяжёлых молекул меньше, чем для лёгких, молекулы  $DH^{16}O$ ,  $H_2^{18}O$  менее летучи, чем молекулы  $H_2^{16}O$ . В связи с этим водяной пар над океаном оказывается изотопически обеднённым относительно океанской воды. При дальнейшем движении воздушной массы происходит конденсация, при которой предпочтительно выпадают тяжёлые изотопологи воды, прогрессивно обедняя остающийся водяной пар по мере выпадения новых порций атмосферных осадков (рисунок 1). Изменение изотопного состава воды при фазовых переходах называется фракционированием. При этом в большинстве случаев фракционирование изотопов водорода и кислорода

происходит пропорционально. При равновесных условиях и температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  коэффициенты фракционирования (соотношение между парциальным давлением лёгких и тяжёлых молекул) для  $\text{DH}^{16}\text{O}$  и  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ , равны соответственно 1,08 и 1,009, то есть при таких условиях  $\delta^{18}\text{O}$  водяного пара будет составлять  $-9\%$ , а  $\delta\text{D} - 80\%$  (Dansgaard, 1964).

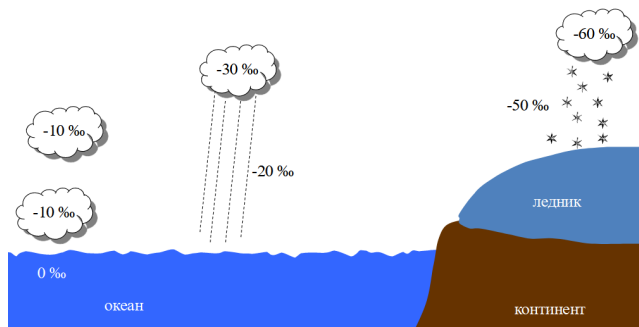


Рис. 1 — Гидрологический цикл и изменение  $\delta^{18}\text{O}$  воды (Екайкин, 2003)

Изотопный состав атмосферных осадков определяется рядом факторов, ведущим из которых является разница между температурой воздуха в месте формирования воздушной массы и температурой воздуха в месте выпадения осадков. Линейная зависимость изотопного состава воды атмосферных осадков от температуры воздуха в месте их выпадения была впервые установлена В. Дансгором на основе многочисленных наблюдений за изотопным составом осадков в разных регионах мира (Dansgaard, 1953), (Dansgaard, 1964). В дальнейших работах (см. обзор в Sharp, 2017) были уточнены параметры этой зависимости.

В первой главе также сделан обзор основных результатов, полученных при исследовании изотопного состава ледниковых кернов из горных областей. Исследования факторов, влияющих на изотопный состав альпийских кернов, наиболее полно выполнены для ледников Гренцглетчер (Grenzgletscher) и Фишерхорн (Fischerhorn) в центральной части Альп, в Швейцарии (Mariani et al., 2014). Эти точки уникальны тем, что позволяют провести калибровку данных, полученных по ледниковым кернам с реальными данными метеонаблюдений, проводившихся в непосредственной близости от точек бурения. Кроме того, эти ледники расположены в разных частях Альп и их сопоставление позволяет определить репрезентативность данных, полученных по одному керну для всего горного региона. В результате исследования были получены следующие результаты. На ледниках Гренцглетчер и Фишерхорн сезонный цикл изотопного состава снега и льда связан с изменениями температуры воздуха. Однако, корреляция между межгодовыми вариациями изотопного состава кернов и температурой воздуха незначима, что можно объяснить неравномерностью выпадения



осадков, изменением источников влаги, а также постдепозиционными эффектами, оказывающими влияние на изотопный состав снежной толщи (Mariani et al., 2014). В связи с неравномерностью выпадения осадков в течение года на леднике Гренцглетчер, изотопный состав коррелирует только со среднезвешенной по осадкам температурой, что не представляет интереса для палеоклиматических реконструкций. На леднике Фишерхорн осадки выпадают равномерно в течение года, что также приводит к значимой ( $r = 0,44$ ) корреляции между изотопным составом керна и температурой воздуха. Это значение коэффициента корреляции близко к полученному для того же керна при изучении сезонных вариаций исследуемых параметров (Mariani et al., 2014). Исследования выполненные в Андах, Гималаях, на Алтае также показывают, что в горных районах на изотопный состав осадков оказывает влияние не только температура воздуха, но и другие факторы, такие как тип циркуляции атмосферы, что часто затрудняет выполнение палеотемпературных реконструкций (Vimeux, 2003; Henderson, 2006).

Во **второй главе** описываются использованные в работе материалы и методы. Основным объектом исследования являются ледниковые керны Кавказа. Буровые работы на Западном плато Эльбруса выполнялись в августе-сентябре 2009 г., в результате чего был получен керн длиной 181,8 м в точке с координатами 43°20'53,9" с.ш. и 42°25'36,0" в.д. на высоте 5115 м н.у.м. (Mikhalenko et al., 2015). Для продления климатического ряда бурение было повторено в той же точке в 2012 и в 2013 гг., что позволило получить непрерывный климатический ряд, начиная с 2013 г. включительно. В 2014 г. был получен керн на плато Майли на Казбеке на высоте 4500 м н.у.м. (Kutuzov et al., 2016); в 2006 и в 2017 гг. отбирались пробы из шурфов на Восточной вершине Эльбруса на высоте 5600 м н.у.м. (Чижова и др., 2019), а в 2020 г. там был получен керн льда длиной 96,01 м от поверхности до ложа (Михаленко и др., 2021). В 2018 году на Западном плато выполнено керновое бурение в рамках проекта Ice Memoгу, было получено два керна длиной 150 и 120 м, к настоящему времени проанализированы верхние 20 метров первого керна. В 2020 году проведены буровые работы на Восточной вершине Эльбруса, а в 2021 году на леднике Безенги. Анализ образцов полученных кернов пока не выполнен.

Для измерения изотопного состава воды применялся лазерный анализатор изотопного состава Picarro L2120-i, установленный в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ. Для анализа проб была использована разработанная при участии автора методика, позволяющая измерять образцы с большей производительностью, чем согласно методике, рекомендованной производителем прибора, при сохранении точности полученных данных. Воспроизводимость измерений составила 0,06‰ для  $\delta^{18}\text{O}$  и 0,30‰ для  $\delta\text{D}$ . Всего в рамках настоящего исследования было проанализировано около 7000 образцов.

В настоящей работе использованы данные об изотопном составе четырёх кернов, полученных на Западном плато Эльбруса в 2004 (Михаленко и др., 2005), 2009 (Козачек и др., 2015), 2012 (Кутузов и др., 2014), 2013 и 2018 гг., а также на

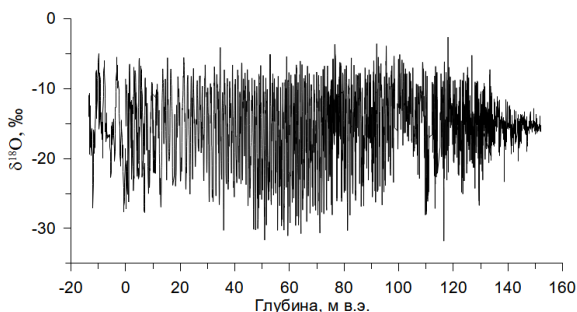


Рис. 2 — Сводный вертикальный профиль изотопного состава ледяных отложений на Эльбрусе. Глубина 0 м соответствует поверхности 2009 года

Казбеке в 2014 г. (Kutuzov et al., 2016). Для составления единого сводного вертикального профиля изотопного состава кернов льда мы перевели глубины всех кернов в водный эквивалент, воспользовавшись данными о плотности. На пересекающихся участках кернов мы рассчитывали среднее значение по двум кернам по интервалам глубины 5 см в.э., при наличии систематического сдвига между двумя кернами, данные приводились к керну 2009 года. Сводный вертикальный профиль изотопного состава показан на рисунке 2.

Датирование выполнялась методом подсчёта годовых слоёв, которые чётко выражены в колебаниях изотопного состава. Средняя годовая амплитуда  $\delta^{18}\text{O}$  составляет 20‰. Минимальные значения изотопного состава осадков, а также температуры воздуха в большинстве случаев наблюдаются в январе, поэтому при датировании кернов минимальные значения изотопного состава были приняты соответствующими 1 января. Среднегодовые значения считались как среднее значение изотопного состава между двумя минимумами в годовых циклах.

Мы сопоставили выделение годовых горизонтов по циклам изотопного состава воды с аналогичной хронологией, полученной по результатам анализа годовых циклов концентрации аммония. В качестве реперных горизонтов были использованы пик трития, соответствующий 1963 году и пик концентрации сульфатов, соответствующий извержению вулкана Катмаи в 1912 г. (Mikhalenko et al., 2015). Разница между двумя хронологиями на реперных горизонтах не превышает 2 года (рисунок 3). Поскольку это различие незначительно, в настоящей работе мы используем датировку, основанную на подсчёте годовых циклов изотопного состава керна. Подсчёт годовых слоёв возможен до глубины 168,6 м, с 1774 до 2009 года (Preunkert et al., 2019).

Для выделения холодных и теплых периодов в керне была использована методика, разработанная для Гренландских кернов и изложенная в (Vinther et al., 2010). Методика основана на том, что в годовом цикле равное количество снегонакопления приписывается обоим сезонам года, при этом минимальные или максимальные значения изотопного состава в годовом цикле соответствуют

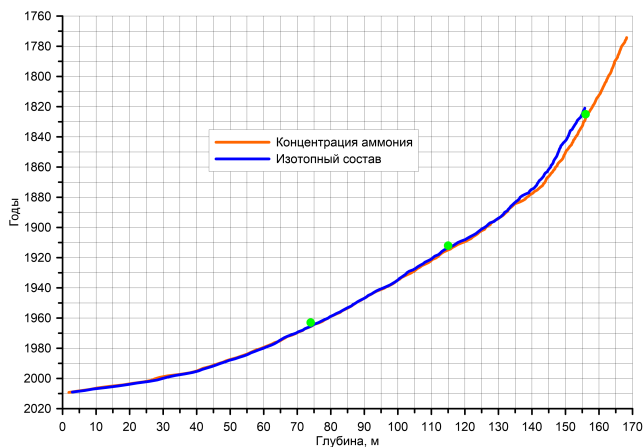


Рис. 3 — Сопоставление соотношения глубина-возраст при разных методах выделения годовых горизонтов. Зелеными точками отмечены участки керна, соответствующие 1963 году (повышенная концентрация трития), 1912 году и 1840 году (повышенная концентрация сульфатов) (Mikhalenko et al., 2015)

середине сезона. Это предположение подтверждается данными о температуре воздуха в регионе. При датировании керна Эльбруса наблюдались случаи, когда при подобном подходе максимум или минимум оказывались в противоположном сезоне. Для решения этого противоречия применялась иная методика: граница между тёплым и холодным сезоном проводилась по середине между минимумом и максимумом изотопного состава в годовом цикле. Пример выделения сезонов представлен на рисунке 4. В метеорологических данных тёплым сезоном мы считаем период с мая по октябрь, а холодным — с ноября по апрель.

В результате датирования кернов получены среднегодовые и среднесезонные значения изотопного состава и дейтериевого эксцесса, представленные в главе 3. Датированная методом подсчёта годовых циклов изотопного состава часть керна охватывает период с 1816 по 2013 год.

Для получения значений скорости снегонакопления по ледяным кернам была определена толщина годовых слоёв. Но при расчёте этих значений необходимо ввести поправки из-за того, что слой выпавшего на поверхность ледника снега уплотняется с течением времени и утончается вследствие растекания ледника.

Для перевода измеренных значений толщины годовых и сезонных слоёв в водный эквивалент применялись значения плотности снега, фирна и льда. Поправка на утончение слоёв вследствие растекания рассчитывалась по формуле Ная (Nye, 1963), (Dansgaard et al., 1969):

$$\frac{\lambda}{\lambda_h} = \frac{H - h}{H} \quad (3)$$

где  $\lambda$  — первоначальная мощность годового слоя;  $\lambda_h$  — мощность годового слоя на глубине  $h$ ;  $h$  — глубина залегания слоя;  $H$  — мощность ледника.

Для расчётов мы использовали мощность ледника, равную длине керна, то есть 181,8 м. Мощность годового слоя определялась как разность глубин между верхней и нижней границами слоя. Средняя годовая аккумуляция принималась равной 1430 мм в.э. Все представленные в работе данные по толщине годовых и сезонных слоёв скорректированы с учётом поправок на уплотнение и растекание.

Для выявления закономерностей формирования изотопного состава кернов использовались суточные данные метеонаблюдений по 13 метеостанциям (рисунок 5). Данные получены на официальном сайте ВНИИГМИ-МЦД ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)). Данные Глобальной сети изотопов в осадках (ГСИО — Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP) находятся в свободном доступе на официальном сайте Международного агентства по атомной энергии ([www.iaea.org](http://www.iaea.org)).

На изотопный состав осадков также влияет характер циркуляции атмосферы, так как он определяет источник формирования воздушных масс и траектории их движения. Для определения источников формирования влаги и путей движения воздушных масс, приносящих осадки в район исследования, нами была использована модель FLEXPART (Forster et al., 2007), (Stohl et al., 2005), которая позволяет рассчитать траектории движения отдельных частиц воздуха на основе анализа вертикальной и горизонтальной составляющих ветра, получаемых по сетке климатических данных, и параметров, отражающих турбулентные и конвективные потоки. В модели используются поля климатических данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF, ERA-Interim) с разрешением  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ , которые доступны с 1979 г. Согласно расчётам

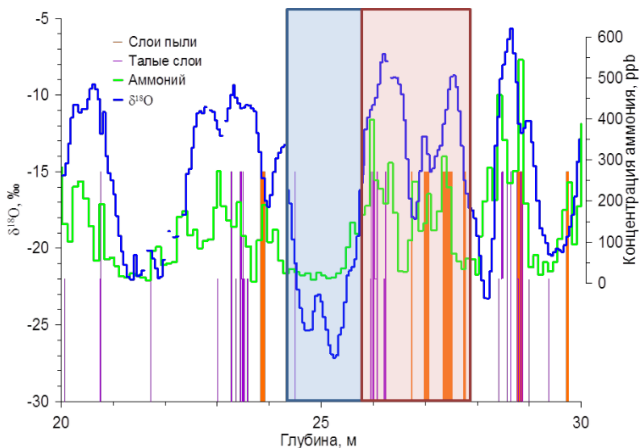


Рис. 4 — Пример выделения сезонных слоёв в кернах. Розовым прямоугольником выделен тёплый сезон, голубым — холодный сезон

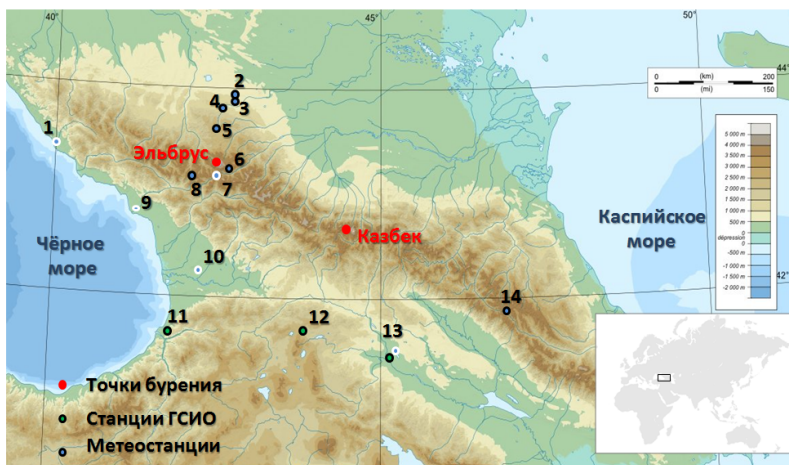


Рис. 5 — Метеостанции и станции глобальной сети изотопов в осадках (GNIP)

обратных траекторий движения воздушных масс по модели FLEXPART, в летний период на Эльбрусе преобладают осадки, выпадающие из воздушных масс, сформировавшихся в этом же регионе, а зимой, наоборот, преобладают осадки, которые приносятся со Средиземного моря и с Северной части Атлантического океана.

Для характеристики типа циркуляции атмосферы применяют различные индексы. В настоящей работе для анализа использовались данные об изменении циркуляционных индексов Северного полушария: NAO, AO, NCP.

Для интерпретации результатов анализа изотопного состава ледяных кернов привлекались данные глобальной сети изотопов в осадках (GNIP) в регионе. Для примера на рисунке 6 представлены графики годового хода  $\delta^{18}\text{O}$  и эксцесса дейтерия на станциях в регионе, которые демонстрируют сезонный ход изотопного состава атмосферных осадков: максимальные значения наблюдаются в июле, минимальные — в ноябре – январе.

Данные GNIP были нами использованы с целью выявления сезонных и средних многолетних изменений изотопного состава атмосферных осадков) и для установления зависимости между изотопным составом осадков и температурой их формирования.

**Третья глава** посвящена исследованию закономерностей формирования изотопного сигнала в ледниковых кернах Эльбруса. Временные ряды среднесезонных значений изотопного состава ледниковой толщи на Эльбрусе, охватывающие период с 1816 по 2014 гг. (рисунок 7), были получены согласно описанной выше методике датирования керна и подхода к выделению слоев льда, образовавшихся в теплые и холодные сезоны года.

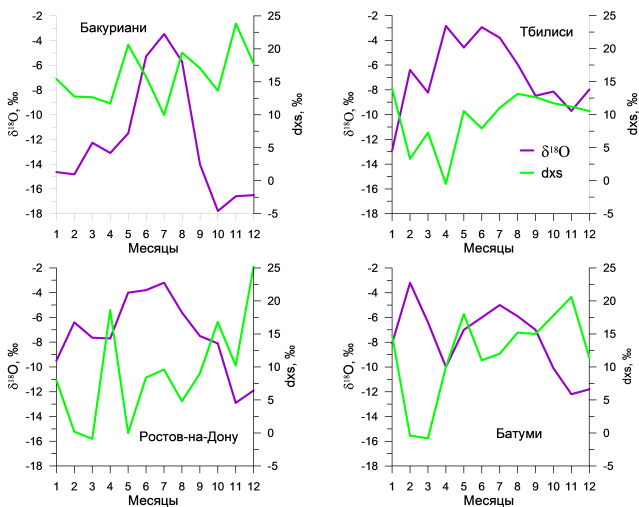


Рис. 6 — Годовой ход значений  $\delta^{18}\text{O}$  (показан фиолетовым цветом) и эксцесса дейтерия (показан зелёным цветом)

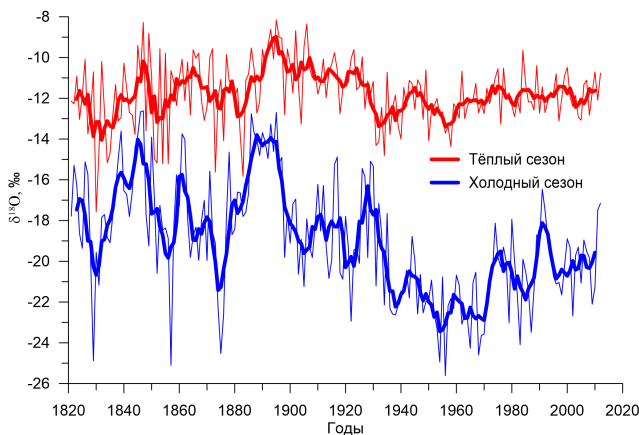


Рис. 7 — Изменение изотопного состава снега и льда на Западном плато Эльбруса за последние 200 лет. Тонкими линиями показаны значения изотопного состава льда, отложенного в теплый и холодный сезоны года, жирные линии — скользящие средние с интервалом осреднения 5 лет

Для исследования связи между изотопным составом ледникового льда на Западном плато Эльбруса и изотопного состава атмосферных осадков в высокогорье Большого Кавказа мы проанализировали пространственную изменчивость изотопного состава осадков по данным Глобальной сети изотопов в осадках (GNIP) (рисунок 6) и сопоставили ее с результатами исследований ледниковых

керна Эльбруса и Казбека. Для этого были использованы данные по четырем станциям, максимально приближенным к Кавказу: Бакуриани, Тбилиси, Ростов-на-Дону и Батуми.

По данным GNIP был рассчитан высотный и долготный градиент изотопного состава осадков, которые составляют  $-0,25\text{‰}/100\text{ м}$  и  $-0,85\text{‰}/100\text{ км}$  соответственно. Разница по высоте между точками бурения на Эльбрусе и на Казбеке составляет 500 м, а расстояние по широте составляет 200 км. Таким образом, средние значения изотопного состава ледниковых кернов на Казбеке должны быть на  $1,25\text{‰}$  выше вследствие уменьшения высоты над уровнем моря, и на  $1,7\text{‰}$  ниже вследствие удаления от основного источника влаги. Средние значения изотопного состава кернов Казбека и Эльбруса совпадают (рисунок 8) что свидетельствует о репрезентативности данных, полученных на Эльбрусе, для всего региона.

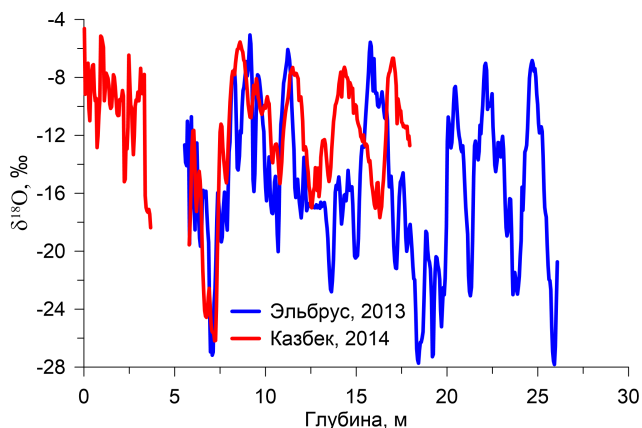


Рис. 8 — Сравнение изотопного состава ледниковых кернов Эльбруса и Казбека (Kutuzov et al., 2016)

На основе анализа пространственной изменчивости изотопного состава атмосферных осадков был сделан вывод, что вариации изотопного состава льда в вертикальном разрезе ледниковой толщи на Западном плато Эльбруса отражают, с учётом высотного и долготного градиентов, временные изменения изотопного состава атмосферных осадков во всей высокогорной области Большого Кавказа.

Полученные среднесезонные данные об изменении изотопного состава атмосферных осадков за период с 1816 по 2013 гг. после независимой экспертной оценки были включены в международную базу данных об изотопном составе атмосферных осадков, ледников, водоёмов, натёчных образований в пещерах PAGES Iso2ka. Предполагается, что эти данные будут использованы для валидации моделей циркуляции атмосферы, использующих изотопный состав

Таблица 1 — Коэффициенты корреляции между характеристиками ледникового керна, данными метеонаблюдений и индексами циркуляции атмосферы в тёплый сезон. Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты ( $p < 0,05$ )

	P (C)	P (Ю)	$\delta^{18}\text{O}$	A	dxs	NAO	AO	NCP
T, °C	<b>-0,35</b>	-0,22	0,13	0,09	0,21	<b>-0,48</b>	-0,10	<b>-0,51</b>
P (C)		<b>0,43</b>	0,07	0,24	0,11	-0,03	-0,14	0,18
P (Ю)			-0,12	<b>0,44</b>	-0,04	0,23	0,08	<b>0,34</b>
$\delta^{18}\text{O}$				-0,17	-0,11	0,06	0,23	-0,04
A					<b>0,27</b>	-0,25	0,05	0,07
dxs						-0,17	0,00	-0,18

P (C) — количество осадков к северу от Главного Кавказского хребта

P (Ю) — количество осадков к югу от Главного Кавказского хребта

A — аккумуляция

T — нормированная температура по региону

атмосферных осадков как один из параметров. Для выявления факторов, влияющих на формирование изотопного состава атмосферных осадков, снега, фирна и льда в высокогорной области Большого Кавказа, выполнялось сопоставление данных об изотопном составе и скорости снегонакопления по керну с метеорологическими данными в регионе, индексами циркуляции атмосферы, а также результатами расчётов в климатических моделях. Для такого сравнения был выбран период времени в сто лет (с 1914 по 2013 гг.), поскольку для этого периода датировка керна имеет сравнительно высокую точность ( $\pm 2$  года), а также доступно большинство данных прямых наблюдений и результатов моделирования траекторий воздушных масс. Для сравнения характеристик ледниковых кернов Эльбруса, (изотопный состав и скорость снегонакопления) с метеопараметрами в регионе (температура воздуха и количество осадков) и индексами циркуляции атмосферы применялся метод корреляционного анализа. Результаты сравнения характеристик для тёплого сезона представлены в таблице 1.

Изотопный состав снега и льда, в первую очередь, определяется температурой воздуха в месте выпадения атмосферных осадков. Для анализа влияния температуры воздуха на изотопный состав снега и льда в регионе применялись региональные нормированные ряды температуры (рисунок 9).

При сравнении изотопного состава и температуры воздуха в регионе статистически значимая корреляция обнаружена только для летнего сезона в период с 1984 г. по настоящее время. В этот период коэффициент корреляции равен 0,62, в целом за весь период исследований он незначим. Это означает, что характер зависимости между параметрами менялся. Анализ результатов моделирования обратных траекторий движения воздушных масс показал, что в летний сезон преобладают осадки, выпадающие из воздушных масс, сформировавшихся близко к месту выпадения осадков (рисунок 10). В этом случае, когда источник влаги стабилен, температура воздуха в месте выпадения осадков и их изотопный



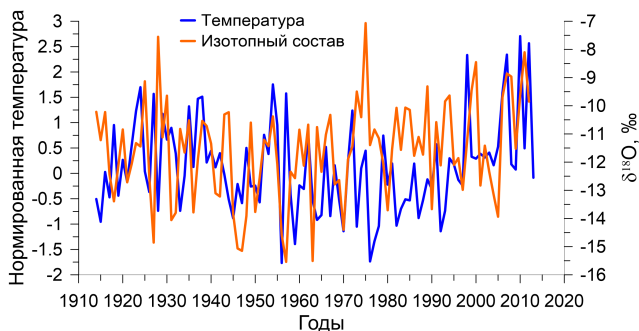


Рис. 9 — Изотопный состав льда, отложенного на Эльбрусе в теплые сезоны года и средняя нормированная температура воздуха теплых сезонов по метеорологическим данным

состав коррелируют. При изменении места формирования воздушных масс расположение источника влаги и длина траектории воздушной массы оказывают преимущественное влияние. При увеличении длины траектории связь изотопного состава с температурой воздуха уменьшается, поскольку увеличивается влияние иных факторов, оказывающих влияние на изотопный состав осадков.

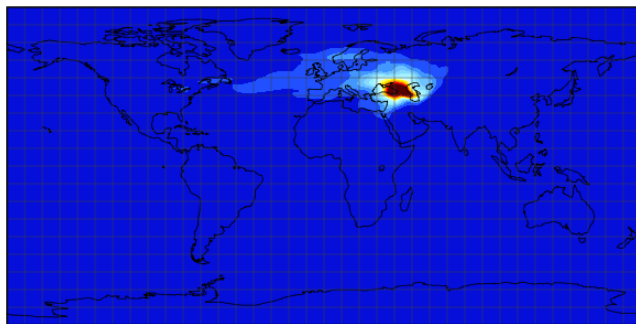


Рис. 10 — Источник влаги в воздушных массах (расчёты по модели FLEXPART, 2001 – 2013 гг.) в теплый сезон года

Наиболее тесная корреляция между температурой воздуха на близко расположенных метеостанциях и изотопным составом ледяного ядра именно в летний сезон можно объяснить тем, что в это время источник влаги более стабилен по сравнению с холодным временем года и расположен вблизи места выпадения осадков, в регионе преобладают конвективные осадки, формирование которых зависит от региональной температуры воздуха. Ранее 1984 г. такой корреляции не установлено. Одна из причин этого, возможно, неточность датировки. Однако при сдвиге датировки на  $\pm 1$  год и использование скользящих

Таблица 2 — Коэффициенты корреляции между характеристиками ледникового керна, данными метеонаблюдений и индексами циркуляции атмосферы в холодный сезон. Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты ( $p < 0,05$ )

	P (C)	P (Ю)	$\delta^{18}\text{O}$	A	dxs	NAO	AO	NCP
T, °C	-0,07	0,11	-0,02	<b>0,31</b>	-0,08	<b>-0,42</b>	<b>-0,45</b>	<b>-0,79</b>
P (C)		<b>0,43</b>	0,25	0,13	-0,01	<b>0,26</b>	<b>0,37</b>	0,23
P (Ю)			-0,09	<b>0,44</b>	-0,06	0,04	0,14	<b>0,25</b>
$\delta^{18}\text{O}$				-0,05	-0,04	<b>0,42</b>	<b>0,34</b>	0,08
Акк					0,04	-0,34	<b>-0,35</b>	0,05
dxs						0,05	-0,09	0,04

см. обозначения в таблице 1

средних значений изотопного состава значение коэффициента корреляции существенно не меняется. Другое возможное объяснение этого факта — перестройка климатической системы, которая происходила в 1970 – 80-х г., примеры которой часто встречаются в научной литературе (Giese et al., 2002), (Ekaykin et al., 2014). Такая перестройка могла изменить места формирования воздушных масс, приносящих осадки на Эльбрус, траектории их движения, а также соотношения осадков, выпадающих из разных типов воздушных масс.

Для периода, когда наблюдается значимая корреляция между температурой воздуха и изотопным составом льда, была рассчитана изотопно-температурная функция. Для этого расчёта были использованы значения температуры воздуха в точке бурения, рассчитанные по данным метеонаблюдений и данным о температурном градиенте. Для расчёта использовались среднемесячные значения температуры на метеостанции Минеральные Воды, а также среднемесячные значения температурного градиента (Торопов и др., 2016). Была получена зависимость, которая описывается уравнением:

$$\delta^{18}\text{O} = 0,63 \times T - 3,6\text{‰} \quad (4)$$

Уровень значимости регрессии  $R^2 = 0,46$  при  $p < 0,05$ .

Коэффициенты этого уравнения близки к полученным ранее для гор Средней Азии (Михаленко, 2007).

В таблице 2 представлены результаты корреляционного анализа характеристик ледникового керна и данных метеонаблюдений в холодный сезон, для которого характерны другие закономерности формирования изотопного состава льда.

Результаты корреляционного анализа показывают, что наиболее значимые коэффициенты корреляции обнаружены при сравнении изотопного состава ледяных отложений и индексов циркуляции, которые характеризуют тип циркуляции атмосферы. Анализ траекторий движения воздушных масс и источников влаги в зимний период (рисунок 11 показывает, что воздушные массы приходят попеременно с Северной Атлантики и из района Средиземного моря.

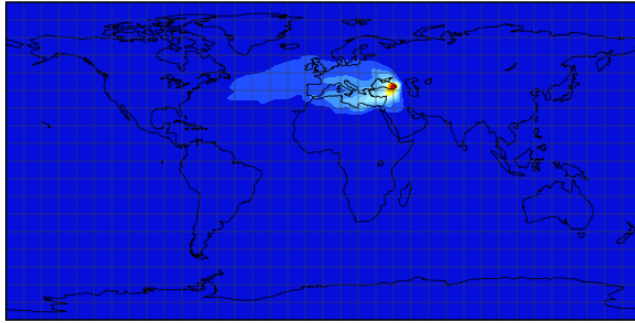


Рис. 11 — Источник влаги в воздушных массах (расчёты по модели FLEXPART, 2001 – 2013 гг.) в холодный сезон года

В зимний период наблюдается значимая, но слабая отрицательная корреляция между скоростью снегонакопления и индексом NAO ( $r = -0,18$ ). В годы с экстремально высокой скоростью снегонакопления (например, 2010) наблюдались также экстремально низкие значения этого индекса. Влияние Североатлантического колебания на климат Кавказа отмечается во многих работах. Например, Шахгеданова и др. (Shahgedanova et al., 2005) обнаружили аналогичную зависимость для данных о балансе массы ледника Джанкуат, расположенного в 30 км к юго-востоку от Эльбруса, за период с 1967 по 2001 г. Значения аккумуляции на леднике связано с изменчивостью осадков в регионе, в то время как последний параметр связан с NAO.

Изменения  $\delta^{18}\text{O}$  кернов положительно связаны с изменениями индекса NAO ( $r = 0,41$ ) в холодный сезон, в то время как изменения того же индекса отрицательно связаны с температурой в тот же сезон ( $r = -0,42$ ). Этот факт также противоречит расчётам, приведённым в работе (Baldini et al., 2008), где на основании данных европейских станций GNIP, расположенных на низких высотных уровнях, была получена отрицательная корреляция между  $\delta^{18}\text{O}$  и индексом NAO. Эта зависимость говорит о разных процессах, влияющих на формирование изотопного состава осадков, выпадающих на разных высотных уровнях. Во время положительной фазы NAO, преобладающим источником влаги для осадков, выпадающих на Кавказе, является Средиземное море. Во время отрицательной фазы — Северная Атлантика. В первом случае значение изотопного состава осадков будет выше, в связи с более высоким изотопным составом воды в источнике формирования воздушной массы (Gat et al., 1996) и более короткой траекторией движения воздушной массы. Вторичное испарение с поверхности континента также приводит к изменению изотопного состава осадков (Eltahir et al., 1996). В то время как значения  $\delta^{18}\text{O}$  становятся ниже, значения эксцесса дейтерия повышаются (Aemisegger et al., 2014), что и наблюдается в данных, полученных по ледниковому керну. В противоположной ситуации изначальный изотопный состав воды на поверхности океана близок к 0‰ (Frew et al., 2000), а длина траектории движения воздушной массы больше, что приводит к более

низким значениям  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках. Расчёты, выполненные в простой изотопной модели (Salamatin et al., 2004), с применением указанных параметров (изотопный состав и температура поверхности океана в разных источниках влаги, взятые из литературных источников, длина траектории движения воздушной массы, температура воздуха в точке выпадения осадков), подтверждают правильность приведённой схемы формирования изотопного состава осадков на Западном плато Эльбруса.

Таким образом, основным фактором, контролирующим изотопный состав атмосферных осадков в высокогорной области Большого Кавказа является тип крупномасштабной атмосферной циркуляции в Северном полушарии, который определяет источник влаги, поступающей в данный район. Связь изотопного состава с местной температурой воздуха слаба и неустойчива во времени. Она проявляется только в тех случаях, когда источник влаги остаётся постоянным в течение продолжительного времени. Летом большое влияние на формирование атмосферных осадков оказывает конвекция, что плохо учитывается в климатических моделях.

При сопоставлении скорости снегонакопления на Западном плато Эльбруса и изменения количества осадков статистически значимая корреляция обнаружена только для средних нормированных значений количества осадков на станциях, находящихся к югу от Главного Кавказского хребта, как для каждого из сезонов (зимой  $r = 0,44$ , летом  $r = 0,44$ , здесь и далее все указанные коэффициенты корреляции значимы с  $p < 0,05$ ), так и для года в целом ( $r = 0,52$ ). Наиболее высокие значения коэффициентов корреляции наблюдаются при сравнении скорости снегонакопления и количества осадков на станции Клухорский Перевал ( $r = 0,72$  во все сезоны), поэтому на рисунке 12 представлены значения количества осадков именно на этой станции.

Надёжные данные по количеству осадков доступны только с 1966 г. поэтому при сопоставлении скорости снегонакопления и количества осадков на станции Клухорский Перевал использовались данные с 1966 по 2013 г. При сравнении рассчитаны линейные уравнения регрессии для каждого из сезонов:

лето:  $P = 678A + 427$ ; зима:  $P = 588A + 504$ , где  $P$  — количество осадков;  $A$  — скорость снегонакопления.

В **четвертой главе** обсуждаются реконструкции изменений температуры воздуха на Кавказе, которые были выполнены на основе закономерностей, описанных в третьей главе.

Большая аккумуляция снега на Западном плато (1400 мм в.э.) и детальность пробоотбора позволили разделить фирново-ледовую толщу на летние и зимние слои, начиная с 1774 г. Толщины отдельных годовых горизонтов с учетом плотности снежно-фирновой толщи и разработанной ранее и апробированной модели течения льда (Оледенение и климат..., 2020). были пересчитаны в значения водного эквивалента каждого годового слоя на поверхности ледника. Графические результаты представлены на рисунке 13. Построенная нами хронологическая шкала (рисунок 3) позволяет восстановить данные по аккумуляции с

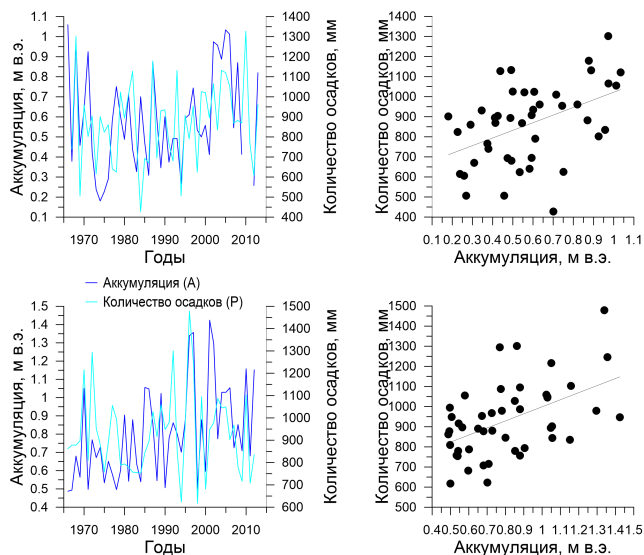


Рис. 12 — Связь количества осадков по данным метеостанции Клухорский перевал ( $P$ ) и аккумуляции ( $A$ ). Верхние графики — холодный сезон, нижние графики — теплый сезон

точностью до 1 года за 2009 – 1912 гг., что хорошо согласуется с изотопными данными (Kozachek et al., 2017). Точность выделения годовых горизонтов составила  $\pm 2$  года в период 1912 – 1825 гг. и понижается до  $\pm 3$ –5 лет в 1825 – 1774 гг. (Preunkert et al., 2019).

Интерпретация результатов реконструкции аккумуляции может быть выполнена при сравнении с метеорологической информацией за период инструментальных наблюдений. Для анализа были использованы данные метеостанций, расположенные в предгорных или горных районах Северного Кавказа (России и Грузии). Половина станций расположена в низкогорных и предгорных районах (менее 1000 метров над уровнем моря), 5 — в среднегорной зоне, и 3 — в высокогорной (более 2000 метров над уровнем моря). Данные метеостанций были использованы для простейших статистических оценок поля осадков на Северном Кавказе, а также для сравнения временных рядов осадков с годовой аккумуляцией на западном плато. Пространственная корреляционная функция годовых сумм осадков была рассчитана относительно наиболее близко расположенной к точке бурения метеостанции Терскол. Очень высокая степень связи ( $r \leq 0.8$ ) для территории Кавказа распространяется на территорию 10 – 50 км. Это означает, что теоретически результаты кернового бурения описывают поле годовых осадков именно на таком пространственном масштабе (в радиусе 10 – 50 км максимально точно, до 100 км — с приемлемой точностью).

С целью выявления возможных причинно-следственных связей были рассчитаны коэффициенты корреляции между реконструированным количеством

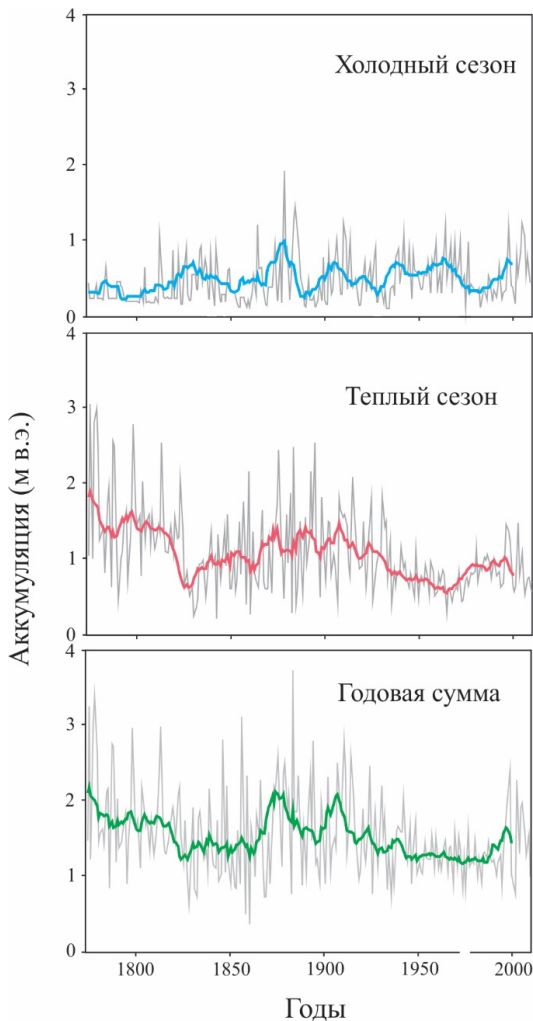


Рис. 13 — Реконструированная аккумуляция на Западном плато Эльбруса по данным ледникового керна. Основной вклад в годовую аккумуляцию составляют осадки теплого сезона, что соответствует данным метеостанций в этом районе Северного Кавказа. Жирными линиями показаны сглаженные по 10 годам значения

осадков и индексами циркуляции атмосферы. Коэффициент корреляции между количеством осадков и индексом NAO =  $-0,42$  ( $p < 0,05$ ), рисунок 14. При этом годы с экстремальными значениями количества осадков – это годы с экстремальными значениями NAO. Подобная зависимость ранее установлена для баланса массы ледника Джанкуат (Shahgedanova et al., 2005).

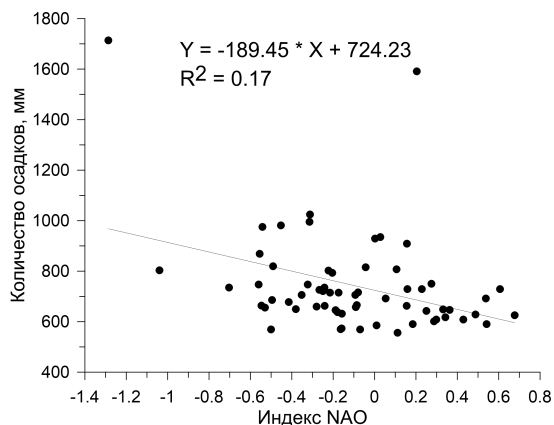


Рис. 14 — Количество осадков и индекс NAO в холодный период

Установленная зависимость объясняется тем, что при индексе NAO > 0 на Эльбрусе преобладают более сухие воздушные массы, поскольку более влажные атлантические воздушные массы проходят по более северной траектории. При индексе NAO < 0 на Эльбрус поступают более влажные воздушные массы с Атлантики. Таким образом, межгодовые вариации количества осадков к югу от Главного Кавказского хребта зависят от типа циркуляции атмосферы.

Увеличение количества осадков в изученном районе в последние десятилетия, по-видимому, отражает глобальную тенденцию, которая связана с общим потеплением климата. Следует отметить, что увеличение количества осадков началось лишь в 1990 году, в то время как глобальное потепление климата началось существенно раньше (IPCC, 2021). Мы предполагаем, что это связано с более поздним началом потепления на Кавказе), а также с особенностями климатических изменений в горных районах (EDW, 2015).

На Западном и Центральном Кавказе хорошо выражена квази-декадная изменчивость атмосферных осадков, соответствующая проявлению внутренней нелинейной динамике климатической системы, которая в умеренных широтах выражено проявляется в феноменах северо-атлантического колебания (NAO), EA/RW и др. Это отчетливо видно по данным с рядом наблюдений 135 лет метеостанции Сочи, расположенной от точки бурения на удалении 190 км. В период 1875 – 1895 гг. на черноморском побережье преобладала положительная аномалия осадков, которая отмечалась и по данным керна льда. Эта влажная эпоха сменилась ярко выраженным засушливым периодом в начале XX в. В данных керна льда этот сухой период не проявился, что может быть связано со значительной удаленностью точки бурения от Сочи, превышающей статистически значимый радиус корреляции. Следующий относительно сухой период (1950 – 1990 гг.) прослеживается как в данных по аккумуляции на Эльбрусе, так и по сочинскому ряду. При этом данные более близко расположенных метеостанций

(Клухор, Теберда, Красная Поляна и Местия) в целом совпадают с тем, что получено по керну: с 1930 по 1990 гг. повторяемость относительно сухих лет была выше, после чего суммы осадков и аккумуляции существенно возросли.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, которые заключаются в том, что:

1. Получен уникальный массив данных по изотопному составу льда в высокогорной области Большого Кавказа, включенный в модели циркуляции атмосферы;
2. Установлены закономерности формирования изотопного состава льда в высокогорной части Большого Кавказа. Показано, что основным фактором, контролирующим изотопный состав атмосферных осадков в высокогорной области Большого Кавказа является тип крупномасштабной атмосферной циркуляции в Северном полушарии, который определяет источник влаги, поступающей в данный район;
3. Показано, что связь изотопного состава с местной температурой воздуха слаба и неустойчива во времени. Она проявляется только в тех случаях, когда источник влаги остаётся постоянным в течение продолжительного времени;
4. Выполнена реконструкция количества осадков в регионе с 1774 по 2018 гг. Выявленные тенденции изменения количества осадков согласуются с ходом глобального потепления климата.

## **Публикации автора по теме диссертации**

1. *Свидетельство о гос. регистрации базы данных.* Гляциологическая и геохимическая информация об изменении климата и окружающей среды в причерноморской области России за последние 200 лет / А.В. Козачек, А.А. Екайкин, В.Н. Михаленко ; ФГБУ «ААНИИ». — № 2016621123 ; заявл. 15.02.2016 ; опубл. 18.08.2016 (Рос. Федерация).
2. *Kutuzov S.S., Mikhalenko V.N. and Grachev A.M., Ginot P., Lavrentiev I.I., Kozachek A.V., Krupskaya V.V., Ekaykin A.A., Tielidze L.G., Toropov P.A.* First geophysical and shallow ice core investigation of the Kazbek plateau glacier, Caucasus Mountains // *Environmental Earth Sciences*. — 2016. — Vol. 6. — P. 1488.
3. *Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н., Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Козачек А.В., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И.* Изотопный состав кислорода снежно-фирновой толщи на Восточной вершине Эльбруса // *Лед и снег*. — 2019. — Т. 59, № 3. — С. 293—305.
4. *Козачек А.В., Екайкин А.А., Михаленко В.Н., Липенков В.Я., Кутузов С.С.* Изотопный состав ледяных кернов, полученных на Западном плато Эльбруса // *Лед и снег*. — 2015. — Т. 55, № 4. — С. 35—49.



5. *Кутузов С.С., Михаленко В.Н., Шахгеданова М., Жино П., Козачек А.В., Лаврентьев И.И., Кудерина Т.М., Попов Г.В.* Пути дальнего переноса пыли на ледники Кавказа и химический состав снега на Западном плато Эльбруса // *Лед и снег.* — 2014. — Т. 54, № 3. — С. 5—15.
6. *Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A.* Multiple climate shifts in the Southern Hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies // *Annals of Glaciology.* — 2014. — Vol. 55, no. 66. — P. 259—266.
7. *Kozachek A., Mikhailenko V., Masson-Delmote V., Ekaykin A., Ginot P., Kutuzov S., Legrand M., Lipenkov V., Preunkert S.* Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt Elbrus ice cores // *Climate of the Past.* — 2017. — Vol. 13. — P. 473—489.
8. *Козачек А.В., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Шибаяев Ю.А., Вайкмяэ Р.* О связи климатической изменчивости Центральной Антарктиды с климатом средних и низких широт Южного полушария // *Проблемы Арктики и Антарктики.* — 2011. — Т. 90, № 4. — С. 5—12.
9. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Козачек А.В.* Изотопный режим подледникового озера Восток по данным исследований глубокого ледяного керна // *Лед и снег.* — 2012. — Т. 52, № 4. — С. 78—85.
10. *Липенков В.Я., Екайкин А.А., Шибаяев Ю.А., Алехина И.А., Преображенская А.В., Козачек А.В., Владимирова Д.О.* Перспективы развития Лаборатории изменений климата и окружающей среды ААНИИ Росгидромета после получения гранта Российского научного фонда // *Лед и снег.* — 2014. — Т. 54, № 4. — С. 135—139.
11. *Екайкин А.А., Козачек А.В., Преображенская А.В., Шибаяев Ю.А., Липенков В.Я.* Гидрологический режим подледникового озера Восток (Антарктида) под данным геохимических исследований ледяного керна и озерной воды // *Вестник Российского фонда фундаментальных исследований.* — 2013. — Т. 78, № 2. — С. 57—63.
12. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Попов С.В., Туркеев А.В., Козачек А.В., Владимирова Д.О.* Пространственная изменчивость характеристик снежного покрова антарктических мегадюн в районе подледникового озера Восток // *Проблемы Арктики и Антарктики.* — 2014. — Т. 102, № 4. — С. 78—89.
13. *Mikhailenko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Faïn X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P.* Investigation of a deep ice core from the Elbrus Western Plateau, the Caucasus, Russia // *The Cryosphere.* — 2015. — Vol. 9. — P. 2253—2270.
14. *Mikhailenko V.N., Kozachek A.V., Ekba J.A.* Transformation of the initial isotopic composition of precipitation in caves of the South-Western Caucasus // *Geography, Environment, Sustainability.* — 2015. — Vol. 2, no. 8. — P. 4—12.

15. *Lim S., Faïn X., Ginot P., Mikhalenko V., Kutuzov S., Paris J.-D., Kozachek A., Laj P.* Black carbon variability since preindustrial times in the eastern part of Europe reconstructed from Mt. Elbrus, Caucasus, ice cores // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2017. — Vol. 17. — P. 3489—3505.
16. *Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Екайкин А.А., Лаврентьев И.И., Козачек А.В., Чернов Р.А.* Изотопный состав снега и льда на ледниках Новой Земли // *Лед и снег*. — 2017. — Т. 57, № 3. — С. 293—306.
17. *Екайкин А.А., Владимирова Д.О., Тебенькова Н.А., Бровков Е.В., Верес А.Н., Ковязин А.В., Козачек А.В., Линдрен М., Шибяев Ю.А., Преображенская А.В., Липенков В.Я.* Пространственная изменчивость изотопного состава и скорости накопления снега на снегомерном полигоне станции Восток (Центральная Антарктида // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2019. — Т. 65, № 1. — С. 46—62.
18. *Chernyakov G.A., Vitelli V., Alexandrin M.Y., Grachev A.M., Mikhalenko V.N., Kozachek A.V., Solomina O.N., Matskovsky V.V.* Dynamics of seasonal patterns on geochemical, isotopic, and meteorological records of the Elbrus region derived from functional data clustering // *Geography, Environment, Sustainability*. — 2020. — Vol. 13, no. 3. — P. 110—116.
19. *Скақун А.А., Чихачев К.Б., Екайкин А.А., Козачек А.В., Владимирова Д.О., Верес А.Н., Веркулич С.Р., Сидорова О.Р., Демидов Н.Э.* Изотопный состав атмосферных осадков и природных вод в районе Баренцбурга (Шпицберген) // *Лед и снег*. — 2020. — Т. 60, № 3. — С. 379—394.
20. *Тебенькова Н.А., Екайкин А.А., Лэппле Т., Нотц Д., Козачек А.В., Верес А.Н.* Связь изотопного состава разных типов осадков в Центральной Антарктиде с температурой воздуха // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2021. — Т. 67, № 4. — С. 368—381.
21. *Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Михаленко В.Н., Судакова М.С., Козачек А.В.* Пространственно-временная изменчивость снегонакопления на Западном плато Эльбруса (Центральный Кавказ) // *Лед и снег*. — 2022. — Т. 62, № 2. — С. 165—178.
22. *Изобретение.* Способ восстановления рядов метеорологических характеристик по данным исследований ледяных кернов горных районов / А.В. Козачек, А.А. Екайкин, В.Н. Михаленко (Российская Федерация) ; ФГБУ «ААНИИ». — № 2643706 ; заявл. 02.05.2018 ; приоритет 29.12.2015, 2015157163(088247) (Рос. Федерация).

*Козачек Анна Владимировна*

Закономерности формирования изотопного сигнала в ледниковых кернах Эльбруса

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. геогр. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

