



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Анализ климата прошлого по палеоклиматическим данным»

Исполнитель Аксененко Георгий Константинович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор технических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Лобанов Владимир Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Сероухова Ольга Станиславовна
(фамилия, имя, отчество)

«17» 06 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

Оглавление

Введение.....	2
1. Палеоклиматология и её методы.....	5
1.1. Краткая история палеоклиматологии	5
1.2. Методы палеоклиматологии	7
Однако, не смотря на свою высокую точность, изотопный метод определения палеотемператур имеет и ряд ограничений:.....	13
1.4. Изотопный метод	19
2. Оценка климатических изменений за последние сотни тысяч лет.....	23
2.1. Обзор климатического периода.....	23
2.2. Антарктида.....	24
2.3. Гренландия.....	42
2.4. Горные ледники.....	48
2.5. Сопоставление результатов	49
3. Оценка климатических изменений за последние десятки тысяч лет	52
3.1. Обзор климатического периода.....	52
3.2. Антарктида.....	53
3.3. Гренландия.....	60
3.5. Сопоставление результатов	66
4. Оценка климатических изменений за последние 2 тысячи лет	68
4.1. Обзор климатического периода.....	68
4.2. Антарктида.....	69
4.3. Гренландия.....	79
4.4. Ледники гор	85
4.5. Сопоставление результатов	89
Заключение	91
Список литературы	94

Введение

Климатическая система Земли была сформирована практически в начале архея и ей уже 3,5 млрд. лет. За этот огромный период как сама атмосфера, так и климат претерпевали значительные изменения и колебания, связанные с чередованием теплых и ледниковых периодов.

Современный климатический режима сформировался в кайнозой примерно 38 млн. лет назад и характеризуется следующими основными особенностями:

- совпадение одного из континентов с полюсом и расположение большей части материков в высоких широтах, что определяет климатическую асимметрию полушарий и большую роль альбедо;

- наличие криосферы: наземное, подземное и морское оледенения;

- наличие психросферы (придонные холодные воды с $T < 8^{\circ}\text{C}$);

- температурная асимметрия океана и атмосферы (температура океана $5,7^{\circ}\text{C}$, воздуха $14,2-15,0^{\circ}\text{C}$).

- обогащение океана CO_2 (лучшая растворимость в холодной воде, изъятие из атмосферы);

- температурный градиент воды в океане экватор – полюс и поверхность – дно достиг $15-20^{\circ}\text{C}$;

- температурный градиент экватор – полюс в атмосфере $28,2$ и $59,7^{\circ}\text{C}$ в Северном полушарии (лето и зима) и $40,2$ и $74,2^{\circ}\text{C}$ – в Южном.

- большая скорость вертикальной циркуляции океана (250-1000 лет) и придонных течений (до $0,5$ м/с).

- сформировался ветровой механизм атмосферной циркуляции с циклоническими процессами, меридиональным переносом и системой западных ветров;

- Антарктида изолирована мощными ветровыми океаническими течениями;

- резко выраженная климатическая зональность на суше и в океане;

- высокая «чувствительность» климата высоких широт к астрономическим изменениям солнечной радиации.

Для того, чтобы понять современный климат, его изменения, а тем более предсказать будущий климат, необходимо знать историю климата, по крайней мере, за последние несколько миллионов лет. К сожалению, массовые инструментальные наблюдения охватывают период последних 150 лет, за исключением некоторых исторических рядов в отдельных пунктах продолжительностью 200-300 лет. Сведения о существенных климатических изменениях, представленные в летописях, охватывают период последних 3-5 тысяч лет, а вся остальная информация о климате является косвенной и может быть получена только методами палеоклиматологии. Поэтому на основе инструментальных наблюдений можно изучать климатическую изменчивость и изменения климата 100-летнего масштаба за 1-2 цикла, на основе летописей – столетнего масштаба и нескольких тысячелетних циклов, а все остальные большие масштабы колебаний климата находятся в области изучения палеоклиматологии.

Палеоклиматология основывается на том, что на Земле остается достаточно много следов из прошлого. Известно высказывание выдающегося философа древней Армении Давида Непобедимого (Анахта), произнесенное 15 веков назад: «Природа не все утаила от нас, так как в противном случае не было бы возможности что-либо постичь, и не все сделала явным, ибо тогда не было бы исследования, но все устроила природа так, чтобы ее можно было бы познать через исследование и разыскание».

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы на основе применения изотопного метода палеоклиматологии для ледяных кернов и полученной на его основе информации:

- оценить особенности изменения климата Земли за разные интервалы времени: сотни тысяч лет, десятки тысяч лет и климат нашей эры;
- сравнить основные периоды, связанные с потеплениями и похолоданиями в разных точках Земли для оценки масштабов их проявления.

В данной работе будет рассмотрено применение геокриологического метода реконструкции температуры на основе соотношений изотопов $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $\text{D}/^1\text{H}$ в ледяных кернах за период от 2 до 800 тысяч лет.

1. Палеоклиматология и её методы

1.1. Краткая история палеоклиматологии

Впервые о том, что древний климат отличается от современного, стали задумываться в 17 веке, после найденных на территории Европы и Северной Америки ископаемых останков тропических растений и животных, а эти территории обладают более суровым климатом.

Начальным этапом развития палеоклиматологии можно считать первые попытки палеоклиматических изысканий английского естествоиспытателя Роберта Гука в 1686 году, который сделал предположение о том, что в прошлом на Земле климат был более тёплым, а его последующие изменения произошли в связи с изменением наклона земной оси. Спустя чуть более века в 1778 году естествоиспытатель граф Жорж-Луи Леклерк де Бюффон в своём сочинении «Эпохи природы» высказал мнение о том, что изменение климата земли в холодную сторону происходит благодаря остыванию её недр. В защиту своего мнения он приводил найденные останки слонов и носорогов, обитавших в прошлом даже в полярных областях, а эти земли, как водится, в прошлом по температурному режиму не уступали современным тропикам. Так завершился начальный этап становления палеоклиматологии, охватывающий 17 и 18 столетия, который основывался лишь на полуфантастических догадках и домыслах о древнем климате, основой которых служили только единичные находки ископаемых останков.

Начало последующего этапа развития палеоклиматологической науки началось с открытия в Европе следов четвертичного оледенения, которое очень заинтересовало естествоиспытателей того времени и надолго привлекло их внимание. В связи с этим знаменательным открытием ему было дано два объяснения. Первое провозглашало оледенение следствием дрейфта, когда эрратические валуны, рассеянные по всей Северной Европе, были занесены плавающими льдами. Сторонниками этого положения были

естествоиспытатели Луи Агассиц и Ж.Шарпантье. Второе объяснение, которое продвигали исследователи Альп, представляло собой положение, по которому древние ледники, будучи гораздо мощнее современных, спускались до уровней гораздо ниже современного оледенения. Его сторонниками были математик и географ Джон Плейфер и инженер, натуралист и гляционист Игнац Венетц.

Саму же причину оледенения исследователи той поры видели в прохождении Земли холодных областей мирового пространства (сторонником был Пуассон), а также в периодичности изменений элементов орбиты планеты Земля.

Уже к началу второй половины 19 века теория материкового оледенения получает признания, а также появляются первые сведения об оледенении Восточной Европы. В тоже время накапливались показатели палеоклиматов и по другим периодам. Так на территории Западной Европы на континентальных отложениях третичной системы были найдены тропические растительные останки. Не обделило находками и море, в морских отложениях мезозоя были обнаружены коралловые рифы, связанные с тропическим климатом.

Второй этап развития палеоклиматологической науки характеризовался хоть и медленным, но накоплением сведений о климатах прошлого, привлечением в качестве индикаторов климатических условий органических останков и литологических данных. И всё же представления о климатах прошлого оставались отрывочными и во многом ошибочными.

С начала второй половины 19 века палеоклиматология обретает подлинно научный характер, то есть становится наукой в современном ее понимании. В это время появляются исследования, которые формируют верные представления о климатах прошлого. Проблема оледенения также остается в центре внимания. Уже в 1875 году Отто Мартин Торрель доказывает воздействие на исчерченные поверхности скал и глыб, располагающихся на равнинах Северной Европы, материковых ледников,

которые некогда покрывали всю территорию современной Скандинавии и доходили до Среднегерманских возвышенностей.

В 20-ом веке развитие палеоклиматологии убыстряется, проводятся литологические и палеонтологические исследования, которые активно применяются при реконструкции климата. В 1950 году Гарольдом Клейтоном Юри была разработана методика изотопной палеотермии.

Ныне палеоклиматология является вполне самостоятельной многопрофильной наукой. [5,9]

1.2. Методы палеоклиматологии

Палеоклиматология – это наука о климатах прошлого и климатической истории Земли. Источники информации о климатах прошлого, включая объект исследования, соответствующие ему методы, оптимальный период исследования и палеоклиматические параметры, которые могут быть получены по данному объекту исследований, приведены в таблице на рис.1.1.

Основными методами палеоклиматологии являются:

- 1) литолого-минералогические методы,
- 2) биогеографические методы на основе ископаемой флоры и фауны ,
- 3) изотопные методы ,
- 4) химические методы,
- 5) дендрохронология.

Объект исследования	Метод исследования	Оптимальный период исследования	Основные климатические параметры
Океанические осадки	Изотопный состав микрофауны Морфологический анализ биогенных осадков Минералогический состав осадков	Последние 100–130 млн лет	Объем континентальных льдов, температура поверхностных и придонных вод, преобладающее направление ветра
Кораллы	Изотопный метод Sr/Ca	Плейстоцен	Температура поверхности воды
Ледяные керны континентальных ледников Гренландии и Антарктиды. Ледяные керны из горных районов	Изотопный анализ Геохимический анализ Газоаналитические исследования	Поздний плейстоцен и голоцен	Температура воздуха, газовый состав атмосферы, прозрачность атмосферы, вулканический аэрозоль
Листовые отпечатки, семена и плоды растений	Палеоклиматический Карпологиический	От мела до голоцена (последние 100 млн лет)	Температура воздуха, условия увлажнения
Озерные и торфяные отложения	Спорово-пыльцевой анализ Палеонтологический Палеоботанический Изотопный анализ	Кайнозой (последние 60 млн лет)	Температура воздуха, осадки, влажность почвы
Бессточные озера	Геоморфологический	Последние 40–50 тыс. лет	Уровень озер, осадки
Годичные кольца деревьев	Дендроклиматический анализ Изотопный анализ	Последние 5–8 тыс. лет	Температура воздуха и осадки
Письменные свидетельства и археологические раскопки		Поздний плейстоцен и голоцен	Условия увлажнения, температуры и осадки

Рисунок 1.2.1. Источники информации о палеоклимате и соответствующие методы

Литолого-минералогические методы

Климат косвенно влияет на процессы выветривания, проявляясь через жизнедеятельность организмов и биохимические процессы разложения этих организмов. Интенсивность такого рода процессов находится в тесной

зависимости от солнечного тепла и увлажнения и таким образом она определяется типом климата.

В качестве индикаторов могут применяться следующие породы:

1) Глины

Являются наиболее распространённой осадочной породой оболочки, в связи с чем представляют ценность в качестве индикаторов. Глинообразование происходит под воздействием выветривания кислого типа, требующее к себе существенную влажность, увесистое содержание в поступающей воде углекислого газа, а также гумусовых кислот. Соответственно в более теплых климатах выветривание идёт более интенсивно. В табл.1.2.1 приведены виды глин, соответствующие разным типам климата.

Таблица 1.2.1

Характеристики выветривания в зависимости от типа климата

Тип климата	Характер выветривания	Главные продукты
Тропический/муссонный	Выветривание круглогодично и максимально интенсивно.	Каолинит, галлуазит
Аридный	Глинообразование ослаблено из-за снижения кислотности вод.	Псаммитовые частицы, карбонаты, осеполиит, палыгорскита.
Средиземноморский	Роль гумуса снижена из-за менее развитого	Значительное накопление

	покрова. Кислые среды имеют узкое распространение.	гидроксидов и малое развитие каолинита
Умеренный	Выветривание ослабевает из-за уменьшения солнечной энергии. Процесс задерживается на начальных и промежуточных стадиях.	Нет полуторных и окислов, малое количество каолинита и галлуазита. Новообразованиями становятся бейделлит, монтмориллонит и гидрослюда.
Холодный	Выветривание практически не происходит.	Глинистые породы практически не образуются.

2) Пески (песчаники)

В случае жаркого невлажного климата или влажного, но теплоумеренного песчаники, при плоском рельефе, приобретают характер мезомиктовых и умеренно полимиктовых. Если климат холодный, то в связи с ослабеванием химического выветривания образуются полимиктовые песчаники.

3) Известняки

Тип климата определяет степень насыщенности морских осадков карбонатным материалом. Соответствие типов известняков при различных типах климата приведено в табл.1.2.2.

Таблица 1.2.2

Соответствие между карбонатной средой и типом климата

Климат	Карбонатная среда	Характер
Аридный тропический	Экстрааридная	Преобладающая максимальная концентрация карбонатных пород.
Тропический	Высококарбонатная	Несколько меньшее содержание карбонатных пород, повышено содержание пелитоморфных известняков.
Субтропический	Умеренно карбонатная	Малое содержание чистых известняков. Смешанные карбонатно-терригенные осадки.
Переходный от субтропическому к умеренному	Малокарбонатная	Карбонатный материал содержится в малых количествах.
Умеренный	Бескарбонатная	Практически полное отсутствие карбонатного материала.

На достоверность литолого-минералогических показателей отрицательно влияют неясности в условии образования определённых литологических объектов, а также перерывы в осадконакоплении. [2, 9]

Биогеографические методы на основе ископаемой флоры и фауны

Органический мир определённой области в значительной мере определяется климатическими условиями. В табл. 1.2.3 приведены растительные индикаторы типов климата.

Таблица 1.2.3

Растительные индикаторы климата

Тип климата	Индикатор
Жаркий и влажный	Формации тропических лесов
Жаркий и сухой	Ксерофильное редколесье и формации саванн
Умеренный	Формации листопадных лесов

Наиболее предпочтительным показателем является пыльца. Палеозоологическими показателями служат ископаемые остатки древних организмов. [2, 9]

Изотопные методы

Изотопы являются разновидностями одних и тех же химических элементов, поэтому метод изотопного анализа состоит в выявлении их соотношения. Примером является метод Г. К. Юри, разработанный в 1950-х годах. Температура может быть количественно определена по соотношению изотопов ^{18}O и ^{16}O в кальците раковин ископаемых морских беспозвоночных.

В основе этого метода заложен принцип того, что при низкой температуре воды содержание ^{18}O в кальците высокое и соответственно присутствуют резкие изотопные различия. В случае повышения температуры изменяется соотношение $^{18}\text{O}:^{16}\text{O}$ и таким образом появляется возможным рассчитать температуру морской воды. При этом погрешность коэффициента по масс-спектрометру 0.01%, а фактическая погрешность определяемых температур 0.5-1.0 $^{\circ}\text{C}$. Теоретически изотопный метод позволяет определить температуры образования карбонатов с возрастом до 700 млн. лет. В качестве примера применения изотопного метода на рис.1.2.2 показано широтное распределение температуры морской воды, полученное в разные стадии мелового периода и в сравнении с современным.

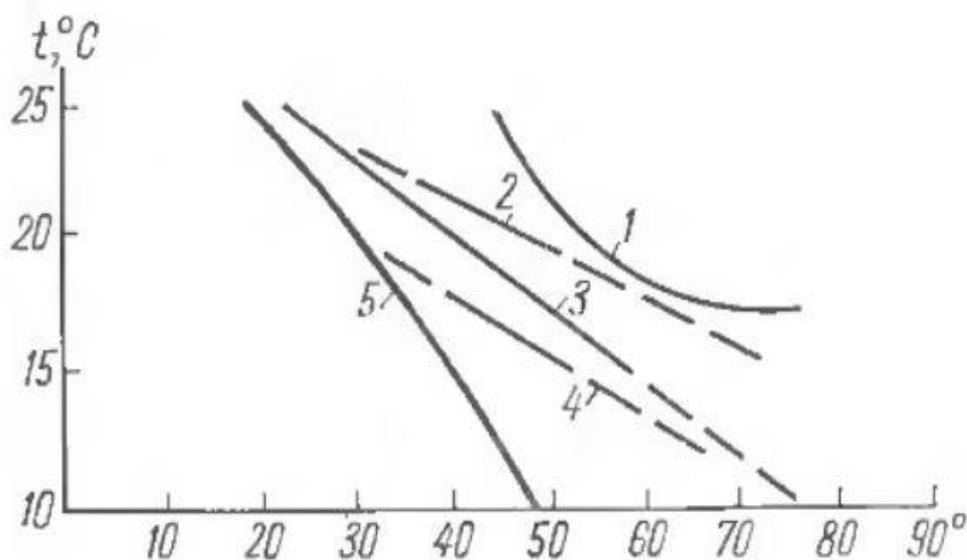


Рисунок 1.2.2 Широтное распределение температуры морской воды в меловом периоде и современное по соотношению $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (Лоуенштам, 1964), где 1- сантон, 2 – Альб, 3 – сеноман, 4 – маастрихт, 5 – современное.

Однако, не смотря на свою высокую точность, изотопный метод определения палеотемператур имеет и ряд ограничений:

1. Изотопный состав кислорода в кальците может быть в значительной мере изменен после образования раковин или карбонатного осадка вследствие процессов диффузии, перекристаллизации, доломитизации и т. п., которые могут происходить как при диагенезе, так и в течение всего последующего существования породы. Особенно этим процессам подвержены образования с недостаточно компактной структурой, испытавшие значительное погружение и обладающие значительным геологическим возрастом.

2. Многие животные и растения могут отлагать карбонаты кальция без сохранения изотопного равновесия кислорода карбонатов и воды. Выявить, существовало или отсутствовало такое равновесие для ископаемых объектов, не всегда возможно или по крайней мере не легко.

3. Еще не известен изотопный состав кислорода древних океанов. Предположение же о том, что он был тождествен современному, может быть ошибочным.

4. Содержание ^{18}O в воде в высшей мере зависит от ее солености. В конечном итоге опреснение сказывается так же на отношении $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в карбонате, как и повышение температуры. Более того, если опреснение связано с добавлением пресной воды, поступающей за счет таяния льда, то оно сильнее влияет на изменение содержания ^{18}O , чем опреснение до того же уровня, но вследствие притоков обычных речных вод.

5. Температуры, полученные по органическим остаткам разных организмов, отобранных из одного слоя, часто различны. Отличаются они, как правило, и от температур, получаемых по вмещающему их карбонатному материалу. Эти различия могут быть вызваны рядом причин:

- а) наиболее интенсивным наращиванием раковин различными организмами при разных температурах;
- б) обитанием организмов на разных глубинах;
- в) различиями биогенного изотопного фракционирования у этих организмов и другими особенностями.

6. Дискретность результатов. Не всегда установить одинаковый шаг по времени в один год. Такая точность наблюдается лишь в верхних слоях ледниковых кернов, а при увеличении глубины становится трудно различить к какому году принадлежит данный слой, что происходит вследствие диффузии, тем самым дискретность возрастает до десятков а то и сотен лет, что ведёт к пробелам в реконструкции хода температуры, а также сглаживает максимумы и минимумы.

Перечисленные причины обусловили то, что определение палеотемператур древних морей были выполнено лишь для юрского и более поздних периодов. При этом большая часть температур для мезозойских морей была определена по рострам белемнитов, так как именно в них лучше всего обычно сохраняется первичное отношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Характерно, что для белемнитов получены более низкие значения температур по сравнению с другими. [2, 9]

Химический метод

Метод основан на отношении кальция и магния в карбонатных скелетах беспозвоночных. В методе используются результаты экспресс-анализа на кальций и магний проб беспозвоночных. Метод имеет такие же ограничения, как и изотопный. [2, 9]

Дендрохронологический метод

Дендрохронология (от греч. dendron – дерево, chronos – время и logos – учение) - это научная дисциплина о методах датировки событий и природных явлений, основанная на анализе годичных колец древесины.

Основой дендрохронологии является то, что рост дерева неодинаков в различные сезоны года. Зимний и летний рост сильно отличаются, основной рост приходится на лето. Рост колец во многом зависит от температуры и влажности окружающей среды. Чем выше температура и больше влажность,

тем больше рост годичного кольца. Это свойство дерева позволяет реконструировать температуру в прошлом. [2, 9]

Однако метод не является очень точным, поскольку на рост дерева влияют не только температура и влажность.

1.3. Основные достигнутые результаты

Докембрий

Рассчитаны значения мгновенного распределения температур лучистого равновесия самой поверхности земли в то время как Земля находилась в афелии. Так в афелии температура в подсолнечной составляла 117°C , а ночью -242°C . Также были получены фазовые состояния газов атмосферы, приведенные на рис. 1.3.1 [6].

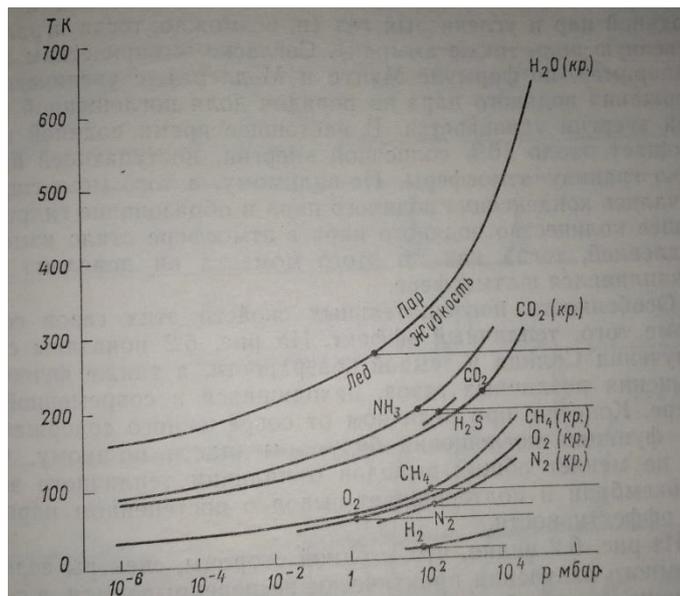


Рисунок 1.3.1. Зависимость между давлением и температурой докембрийской атмосферы и фазовые состояния составляющих ее газов.

Фанерозой

В фанерозое методами палеоклиматологии достаточно точно воспроизведено Гондванское оледенение, максимальная фаза которого

приведена на рис.1.3.2. При оледенении существенно увеличилось альbedo земной поверхности [6].

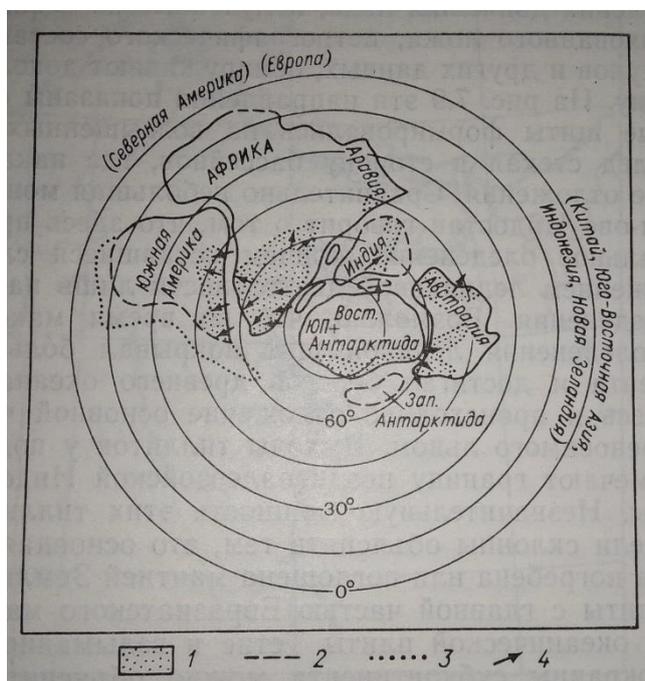


Рисунок 1.3.2. Генеральная схема максимальной фазы гондванского оледенения, где: 1 – область распространения следов ледниковой деятельности, 2 – древняя береговая линия, 3 – современная береговая линия Южной Америки, 4 – направление движение льда [6].

Кайнозой

В период кайнозоя происходило постепенное похолодание до максимального оледенения в плейстоцене и новое оледенение Антарктиды, а также появление морских льдов и ледников в северном полушарии. Реконструкция магнитного поля Земли и его динамики за последние 4 млн. лет в кайнозое показано на рис.1.3.3 [6].

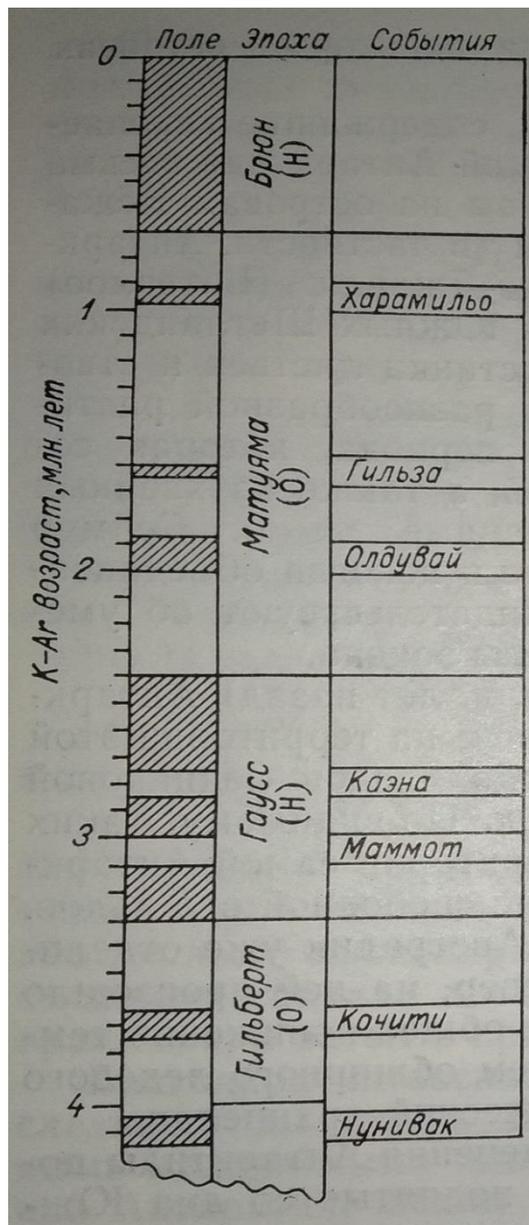


Рисунок 1.3.3. Хронология обращения магнитного поля за последние 4 млн лет.

Плейстоцен

Выявлено полярное покровное оледенение, а также циклические колебания климата, на которые влияли колебания ледников. [6]

Голоцен

Было обнаружено послеледниковое потепление, малый ледниковый период, а также реконструированы температура и осадки за несколько веков. [6]

1.4. Изотопный метод

В основе данной работы лежит геокриологический метод, основанный на анализе изотопного состава ледяного керна. Индикаторами принимается соотношение изотопов кислорода $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и водорода $^2\text{H}/^1\text{H}$, поскольку они являются наиболее стабильными и распространенными и у них достигается наибольшее различие в массах (особенно у изотопов кислорода).

Для определения соотношений указанных выше изотопных пар применяется массспектрометр, точность которого определяется его разрешающей способностью.

Перед тем, как определить температуру по изотопному составу, вычисляется различие между определенным изотопным составом и изотопным составом SMOW. SMOW (Standard Mean Ocean Water) – это среднеокеанический стандарт морской воды, предложенный в 1961 году Х.Крэйгом (табл.4.1.1).

Исследования, проведенные Феридманом (1964) и Крэйгом и Гордоном (1965 г.), показали, что океаническая вода, начиная с глубины 500м, является однородной по изотопному составу, по этой причине Х.Крэйг предложил океаническую воду в качестве стандарта для содержания изотопов кислорода и водорода.

Также наряду со SMOW применяется стандарт SLAP (standard light Antarctic precipitation), введенный для облегчения калибровки итогов

изотопных измерений, а также для измерений в изотопических легких водах и льдах.

В связи с тем, что измерить абсолютное соотношение изотопов $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $\text{D}/^1\text{H}$ достаточно трудная задача, то на практике используется разность значений соотношения изотопов в стандарте и измеряемом образце.

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{обр}} - {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{станд}}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{станд}}} \times 1000, \text{‰} \quad (1.1)$$

$$\delta\text{D} = \frac{\text{D}/^1\text{H}_{\text{обр}} - \text{D}/^1\text{H}_{\text{станд}}}{\text{D}/^1\text{H}_{\text{станд}}} \times 1000, \text{‰} \quad (1.2)$$

Таблица 1.4.1.

Содержание $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $\text{D}/^1\text{H}$ в SLAP и SMOW

Стандарт	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$\text{D}/^1\text{H}$
SMOW	$2005,20 \pm 0,45 \times 10^{-6}$	$155,76 \pm 0,05) \times 10^{-6}$
SLAP	1894×10^{-6}	89×10^{-6}

В данной работе для реконструкции палеотемператур на основе изотопного метода были использованы следующие формулы:

Формулы реконструкции температуры

МАГАТЭ (глобальная формула) $\delta^{18}\text{O} = 0,69 t^{\circ} - 13,6; \delta^2\text{H} = 5,6 t^{\circ} - 100$

Формулы Лориуса $\delta^2\text{H} = (6,04 t^{\circ} - 51); \delta^{18}\text{O} = (0,75 t^{\circ} - 7,6).$

Формула Дансгора $\delta^{18}\text{O} = 0,62 t - 15,25\text{‰}$

Формула Дансгора-Йонсена $\delta^{18}\text{O} = (0,67 \pm 0,02) t - (13,7 \pm 0,5)\text{‰} \quad (1.3)$

Данные формулы были получены при исследовании изотопного состава свежеснега, который связывался с фактической температурой. Корреляция и точность данного метода вышла достаточно высокая при средней квадратической погрешности (СКО) равной $1,2^{\circ}\text{C}$, что демонстрируется на примере формулы Лориуса для $\text{D}/^1\text{H}$ на рис. 1.4.1.

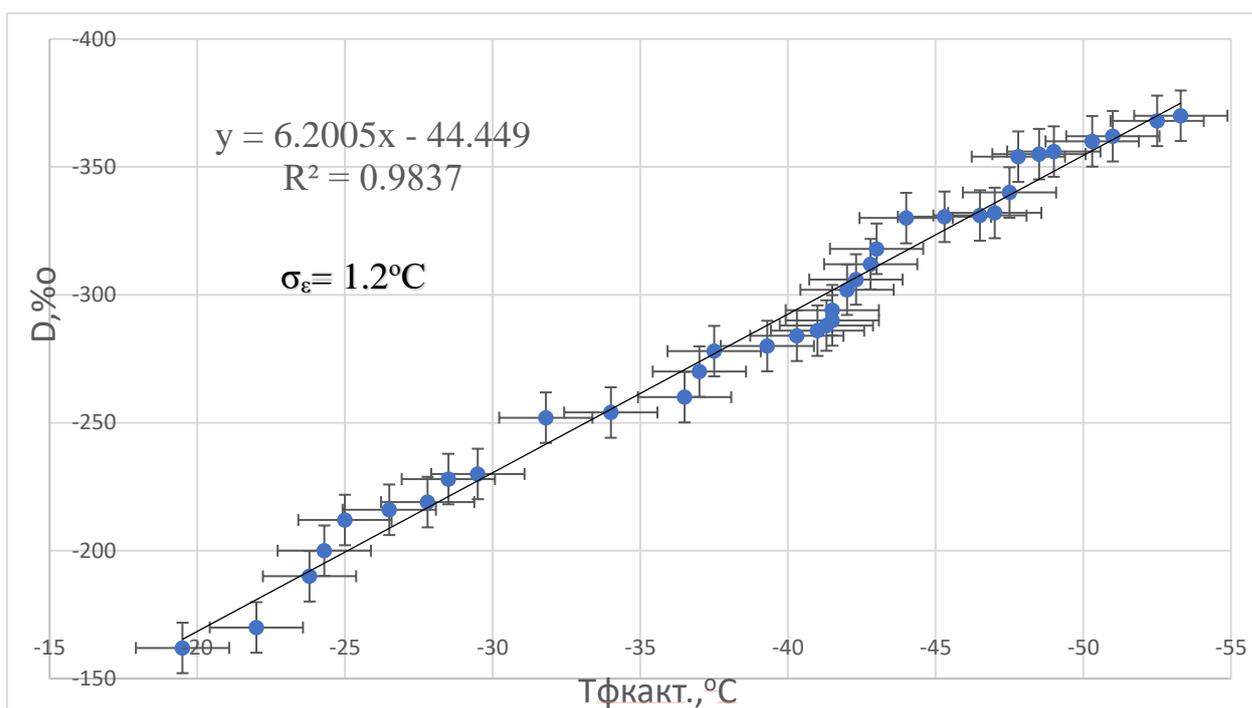


Рисунок 1.4.1. Реконструкция ледниковых кернов проводилась на основе $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $\text{D}/^1\text{H}$ с помощью нескольких методов.

Результатом стала полная синхронность температурных колебаний.
Наблюдается лишь общее смещение температуры до 7.0 °С.

2. Оценка климатических изменений за последние сотни тысяч лет

2.1. Обзор климатического периода

Данный временной промежуток времени попадает в четвертичный период системы антропогена в отдел плейстоцена и в поздний, средний и Калабрийский ярус.

В данном случае сконцентрируемся на среднем плейстоцене. Данный ярус характеризуется периодом охвата от 130 до 800 тыс. лет. Он характерен тем, что на планете наступил ледниковый период, во время которого происходило чередование холодных и относительно теплых временных отрезков. Эти ледниковые периоды были достаточно продолжительные с короткими периодами межледниковья.

За данный период содержание кислорода в атмосфере земли уменьшилось примерно на 2% от значения в настоящее время, а именно от 20,95%.

Период характеризовался оледенением, которое в отдельных районах планеты могло достигать до 40 параллели, а ледник занимал приблизительно 30 % всей поверхности земли, а толщина ледникового щита составляла 1.5-3 км. В данную эпоху происходило наступление ледников, которое повторялось в среднем раз в 40 тысяч лет, а временные промежутки, на которые оно приходилось были периодами похолодания.

2.2. Антарктида

Для реконструкции температуры по ледяным кернам в качестве образцов были взяты несколько научных проектов в Антарктиде, начиная с 1950-х годов. Этими проектами стали: EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica), целью которого было получение кернов большой длины, проводившихся на базе Купола С и японский проект на базе станции Купол Фудзи. В данной работе будет использована информация по кернам из упомянутых выше исследований.

Ледяной керн, представленный на рисунке 2.2.1, принадлежит к проекту EPICA, исследования которого проводились на базе Купола С, и имеет продолжительность в 800 тыс. лет.

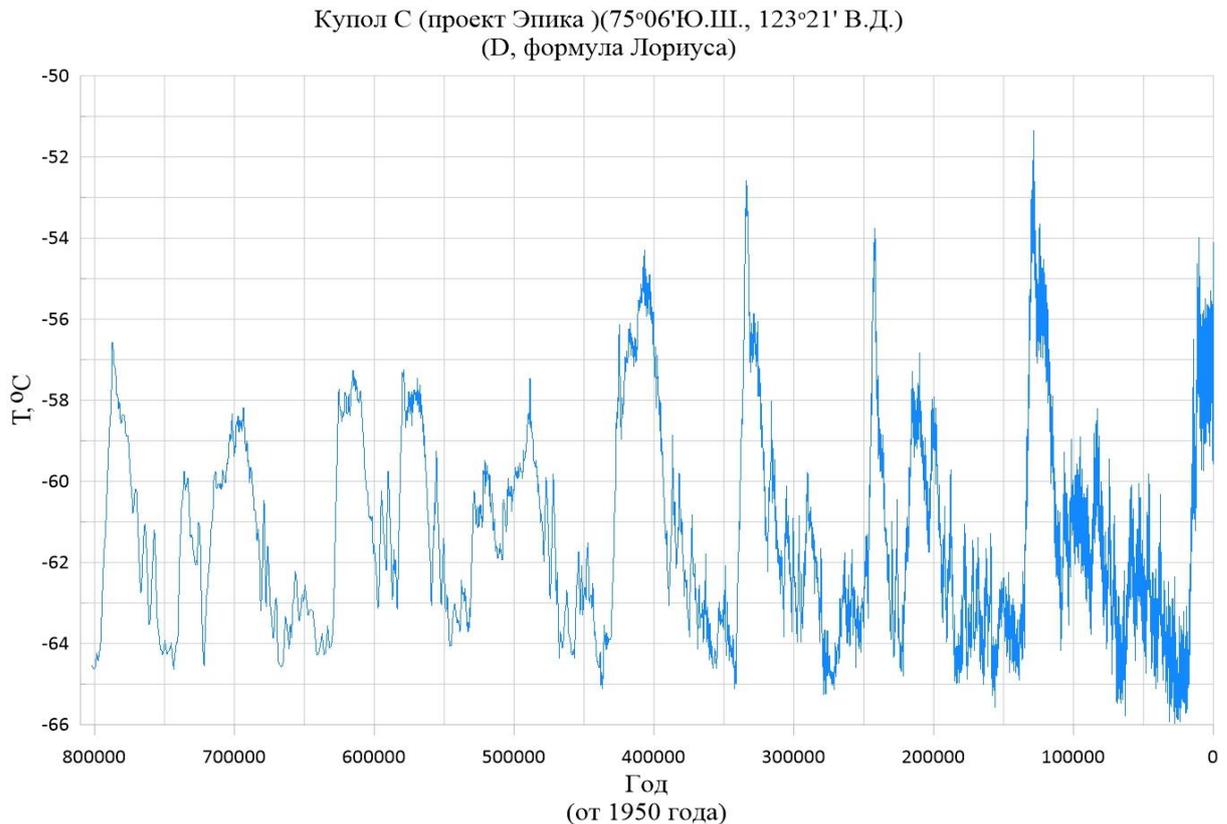


Рисунок 2.2.1. Реконструированный временной ряд изотопной температуры из данных проекта EPICA

Реконструкция температуры проводилась с помощью двух методик, то есть с помощью формулы Лорнуса и глобальной формулы, полученной в

рамках проекта МАГАТЭ, основой для реконструкции был взят δD . Ход температурной кривой показывает, что наблюдаются четкие циклы, продолжительность которых составляет около 100 тыс. лет, которых насчитывается 8, включая полные циклы и часть последнего, начавшегося 17 тыс. лет назад от точки отсчета, за которую принят 1950 год.

Максимум температуры составляет $-51.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и приходится на 128662 год до точки отсчета, а минимум $-66.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, приходится на 27523 год до точки отсчета.

Со временем углубления в прошлое выявляется закономерность, состоящая в том, что амплитуды циклов неоднородны и в первую часть временного периода они меньше, чем во вторую. Данный факт связан с неодинаковой дискретностью температуры, изменение которой представлено на рисунке 2.2.2.

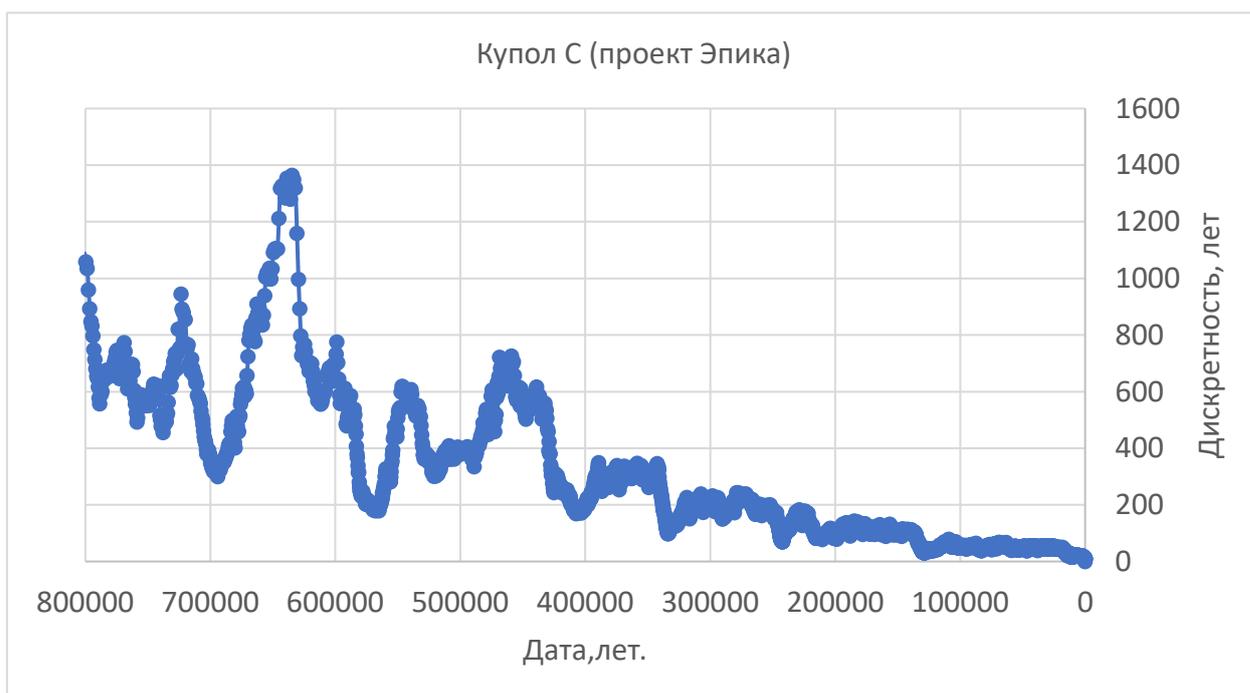
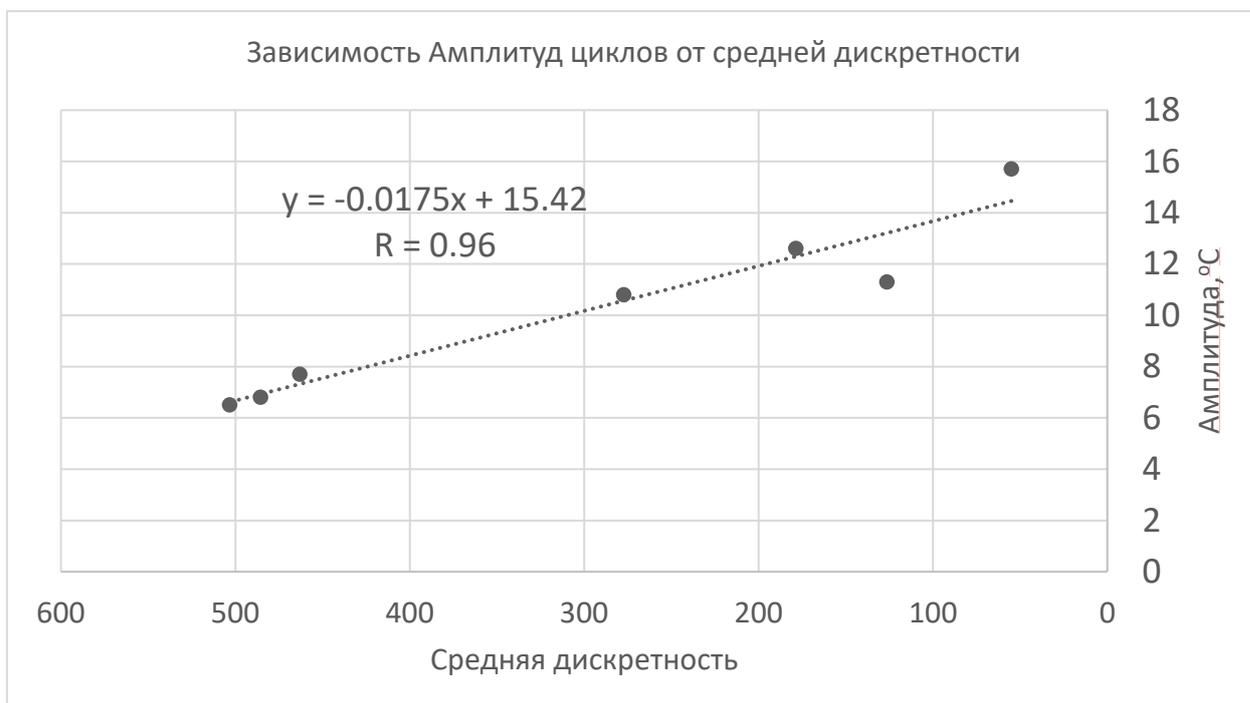


Рисунок 2.2.2. Изменение дискретности измерений изотопной температуры из данных проекта EPICA

Таким образом, наиболее точно максимумы и минимумы отображает вторая половина графика, в которой средняя дискретность составляет около

200 лет. Данная особенность связана не с естественной закономерностью, а с точностью отображения информации, поэтому в целях получения правильных выводов о динамике циклических колебаний температуры была построена



зависимость амплитуды цикла от средней дискретности. Полученная зависимость $A=f(d)$ приведена на рис. 2.2.3.

Рисунок 2.2.3. Зависимость амплитуд 100-тысячелетних циклов температур (в °C) от дискретности (в годах).

Исходя из рисунка видно, что коэффициент корреляции является очень высоким, что подтверждает связь величины средней дискретности и амплитуды цикла. В целях представления корректных данных при построении зависимости на рис.2.2.3 были исключены 2 цикла: первый самый дальний цикл температурной кривой, ввиду его недостаточной точности из-за дискретности и продолжительности и последний цикл, так как он начался совсем недавно.

Следующий керн, подлежащий к рассмотрению - это керн, полученный японскими исследователями на базе Антарктической станции Купол Фудзи (рис.2.2.4).

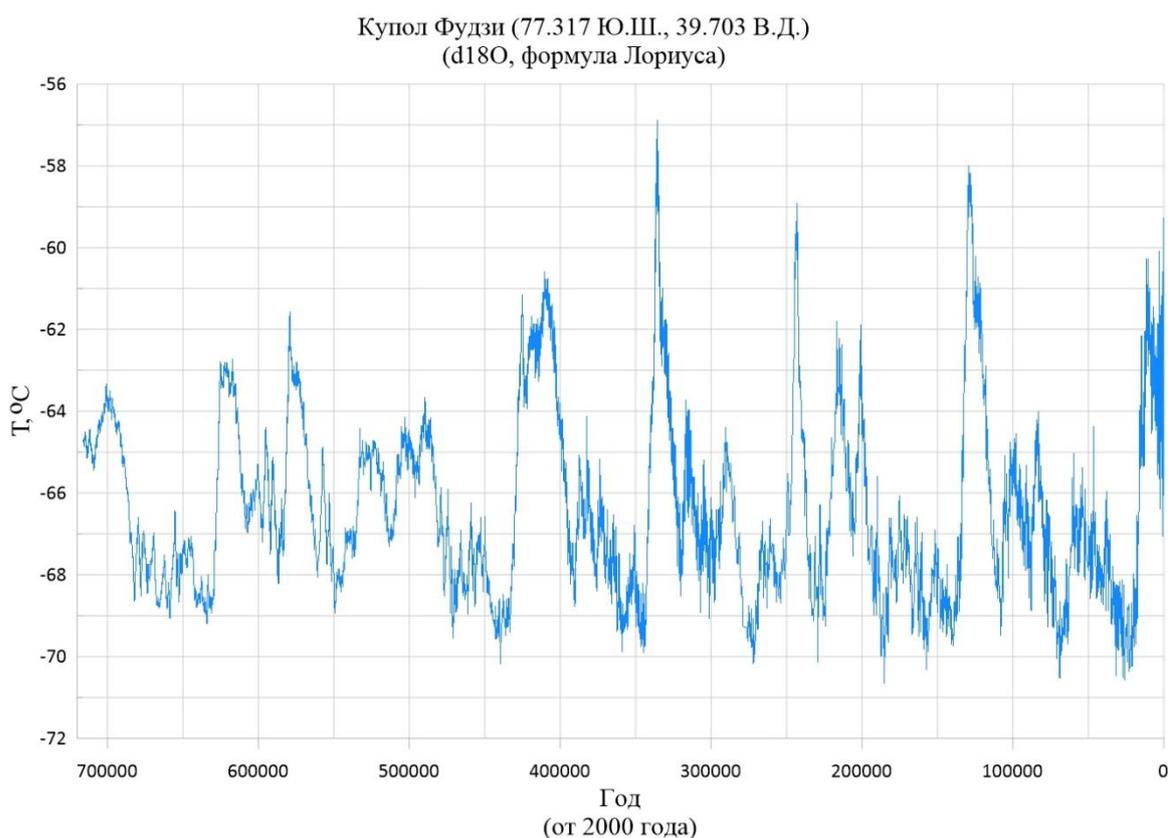


Рисунок 2.2.4. Реконструированный временной ряд изотопной температуры из данных проекта Купол Фудзи

Продолжительность реконструкции проекта Купол Фудзи составила 716 тыс. лет, реконструкция температуры проводилась 4 методиками: по глобальной формуле в рамках проекта МАГАТЭ по δD и δO^{18} и по результатам исследования Лориуса также по δD и δO^{18} . Здесь также явно просматриваются циклы продолжительностью 100 тыс. лет, также как и в результатах проекта

EPICA. Количество полных циклов остается равным 7, а также сюда включается последний цикл, начавшийся за 17-20 тыс. лет до точки отсчета, которая определена в данном образце как 2000 год.

Максимум температуры составляет $-56.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и приходится на 335657 год до точки отсчета, а минимум зафиксирован на уровне $-70.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, приходясь на 185361 год до точки отсчета.

Наблюдается идентичная проекту EPICA закономерность, проявляющаяся в неоднородности амплитуд циклов, а именно амплитуды уменьшаются при движении от настоящего в прошлое и данная закономерность также объясняется неоднородной дискретностью данных, что показано на рис.2.2.5.

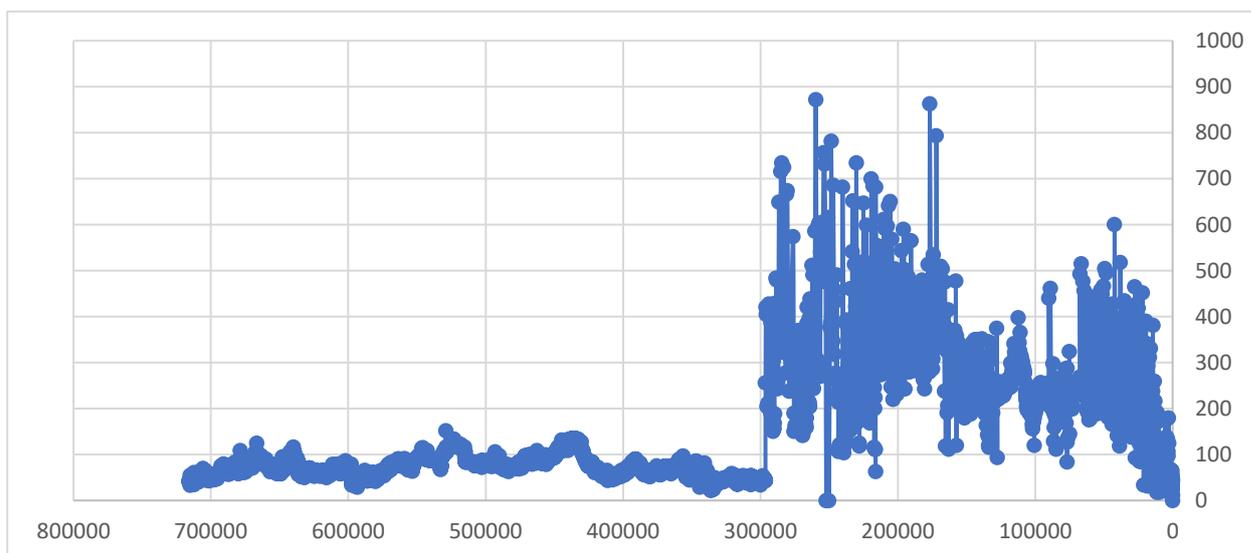


Рисунок 2.2.5. Изменение дискретности измерений изотопной температуры из данных проекта Купол Фудзи

Рисунок 2.2.5 подтверждает, что наиболее точно ход температурной кривой отображает вторая половина графика, а вернее вторая часть второй половины, дискретность которой минимальна в данной выборке. Первая часть графика, а именно от 30000 года до точки отсчета, представлена низкой дискретностью, так как ввиду сложности отделения более ранних слоев от более поздних, даты были высчитаны математически и для этого были взяты участки одинаковой длины по 10см, причем конец предыдущего был началом следующего. Для стандартизации дискретность была приведена к единой длине участков керна, что составляет 10см, результат представлен на рис. 2.2.6

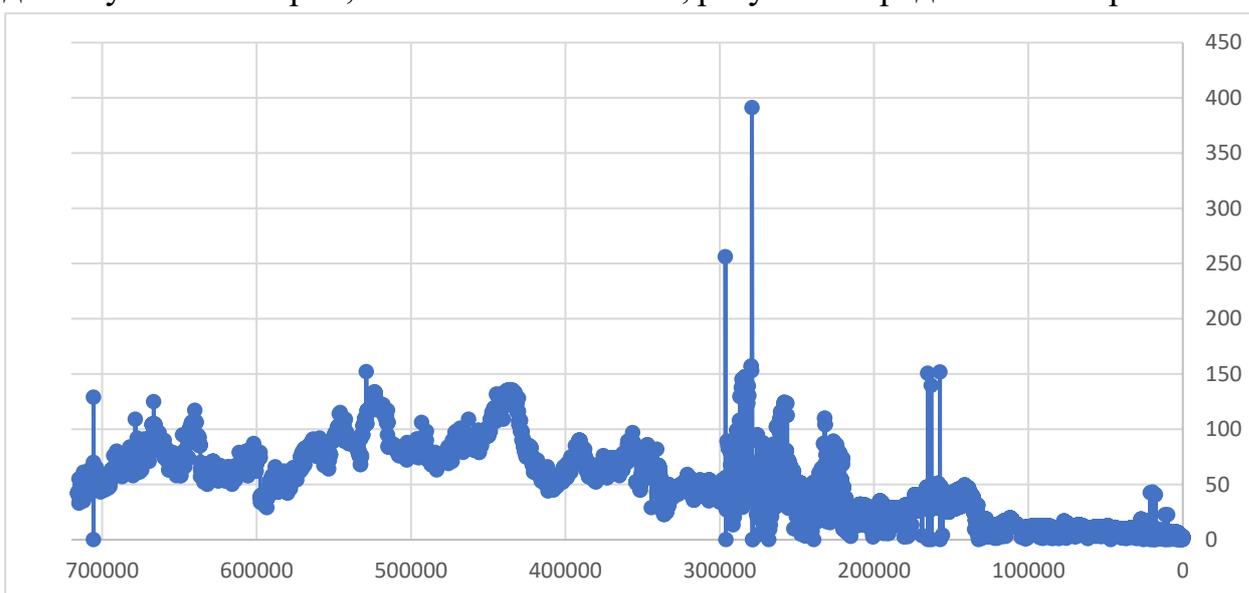


Рисунок 2.2.6. Откорректированная дискретность измерений изотопной температуры из данных проекта Купол Фудзи

После приведения дискретности к единому виду относительно длины участков ледяного керна, она приобрела стандартный вид, возрастая к концу ледяного керна. Данная операция позволяет нам сравнить среднюю дискретность циклов реконструированной температуры с величиной амплитуды циклов. Построенная зависимость средней дискретности от величины амплитуды представлена на рисунке 2.2.7. Перед построением данной зависимости были исключены 2 цикла: цикл, находящийся в промежутке с 370-270 тыс. лет от точки отсчета, так как он находится на

границе фактических значений дискретности и значений вычисленных математически, а также точку амплитуды последнего цикла, так как он начался недавно.

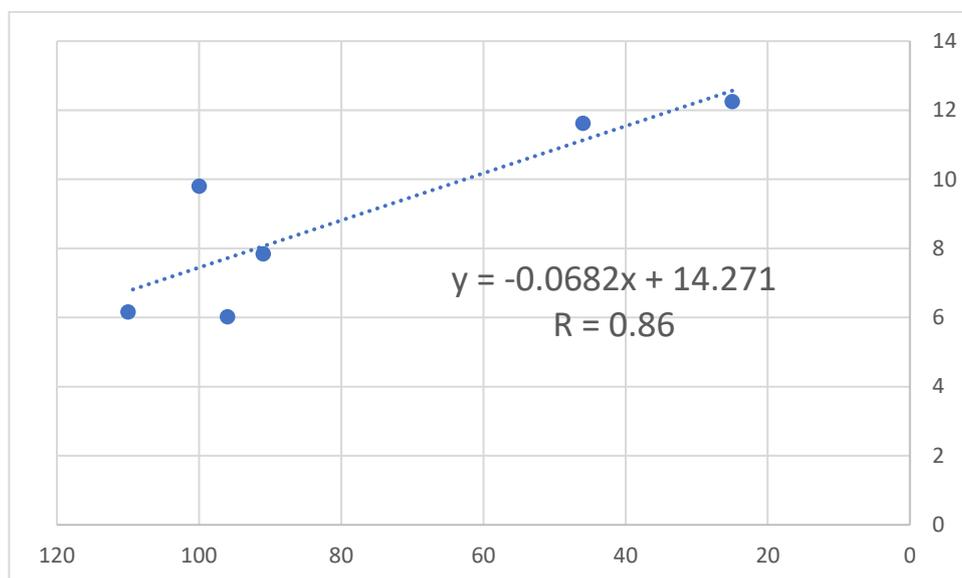


Рисунок 2.2.7. Зависимость амплитуд 100-тысячелетних циклов температур (в °С) от дискретности (в годах) для проекта Купол Фудзи.

Как видно, коэффициент корреляции составляет 0.86, что опять же подтверждает то, что амплитуда колебаний тесно взаимосвязана с дискретностью.

В целях сравнения показаний реконструкций в разных точках, построим таблицу характеристик циклических колебаний.

Сравнение характеристик 100тысячелетних циклов по двум проектам
 EРІСА и Купол Фудзи в Антарктиде

Проек т	№	Пр-сть цикла,лет	A,°C	Vп,°C/100лет	Vпон, °C/100лет	Ап	Апн
EРІСА	1	801622- 743325 (5829)	8.4	(801622- 787298)	(787298- 743325)	9.0	8.9
	2	743325- 665887 (77438)	6.7	(743325- 701546)	(701546- 665887)	4.9	4.8
	3	665887- 545985 (119902)	7.4	(665887- 615060)	(615060- 597190)	8.0	5.8
				(615060- 578645)	(578645- 545985)	5.8	7.0
	4	545985- 436726 (109259)	7.7	(545985- 488555)	(488555- 436726)	6.6	7.7
	5	436726- 342488 (94238)	11.2	(436726- 406860)	(406860- 342428)	10.9	11.2
	6	342428- 277205 (65223)	13.3	(342428- 333277)	(333277- 277205)	12.5	13.4
7	277205- 156174 (121031)	12.2	(277205- 242071)	(242071- 165174)	11.9	12.5	

	8	156174- 17809 (138365)	15.7	(156174- 128662)	(128662- 17809)	14.9	15.6
	9	17809-0 (17809)		(17809-10117)	(10117-0)	12.0	н/д
Купол Фудзи	1	715892- 634038 (81854)	6.0	н/д	(698270- 682071)	н/д	5.7
	2	634038- 549123 (84 915)	7.8	(634038- 624907)	(624907- 586662)	6.2	5.2
				(586662- 578987)	(578987- 549123)	6.8	7.7
	3	549123- 439410 (109713)	6.2	(634038- 489686)	(489686- 439410)	5.4	6.4
	4	439410- 344591 (94819)	9.8	(439410- 410324)	(410324- 344591)	9.9	9.6
	5	344591- 272151 (72440)	13.7	(344591- 335338)	(335338- 272151)	13.6	13.9
	6	272151- 139634 (132517)	11.6	(272151- 243039)	(243039- 139634)	11.7	11.2
	7	139634- 22760 (116874)	12.3	(139634- 129080)	(129080- 22760)	12.2	12.4
8	22760-0 (22760)	11.3	(22760-9969)	н/д	10.2	н/д	

Где:

№- Номер цикла

A-амплитуда цикла

Vп- Скорость подъема

Vпон- Скорость понижения

Ап- амплитуда подъема, °С

Апн- амплитуда понижения, °С

Межледниковье в проекте EPICA

Отдельно рассмотрим периоды межледниковья в проектах EPICA и Купол Фудзи. Выделенные периоды межледниковья показаны на рис.2.2.8 для проекта EPICA.

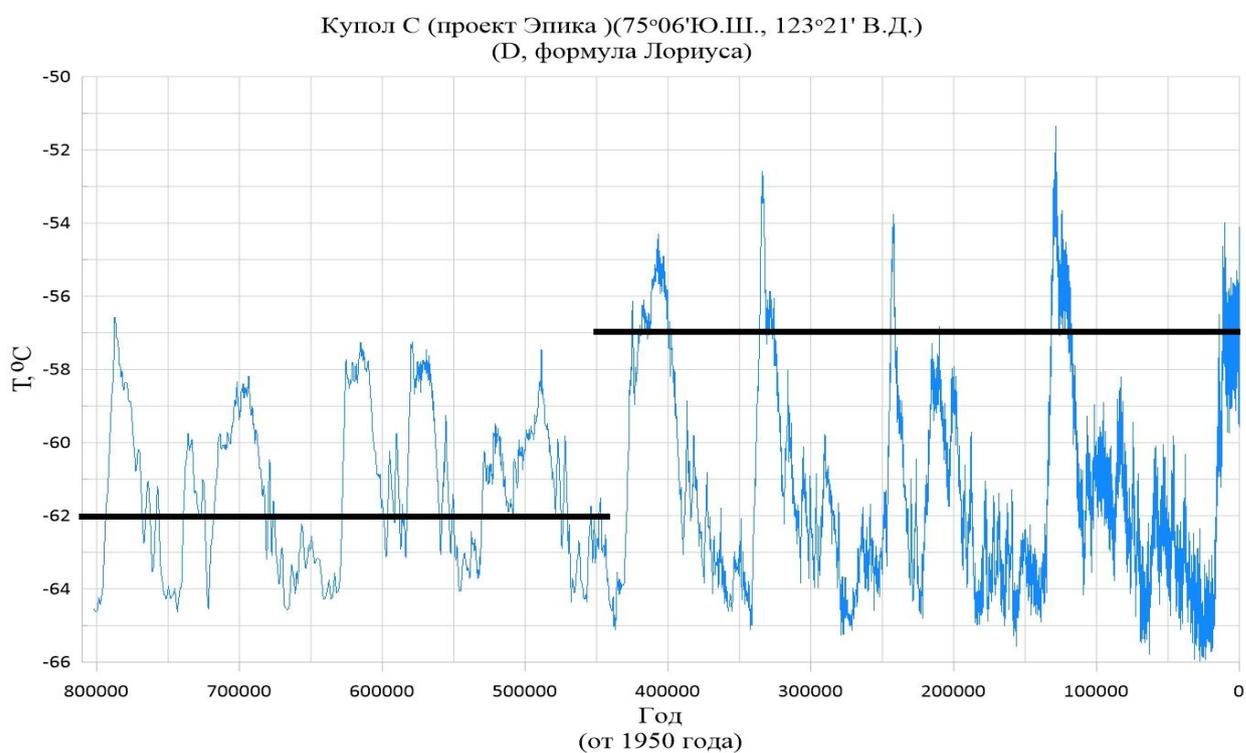


Рисунок 2.2.8. Линии температур, разделяющие периоды межледниковья и ледниковые периоды, на графике изотопных температур из проекта EPICA.

Как следует из рис.2.2.8, средняя температура на протяжении 800 тысяч лет составила $-60,7^{\circ}\text{C}$, именно его мы примем за точку отсчета для того, чтобы определить уровень, выше которого начинается период межледниковья. В связи с разной дискретностью ход температурной кривой разделяется на две части, первая – это промежуток между 800 тыс. лет и 450 тыс. лет, а второй – с 450 тыс. лет и до наших дней. В первой части значение средней температуры составляет $-62,0^{\circ}\text{C}$, так как он охватывает все основные изменения в 100 тыс. летних циклах, в данном случае максимумы играют меньшую роль, поскольку из-за дискретности могут быть сильно занижены. Уровень разделяющий межледниковья и ледниковые периоды во второй части графика составляет -57°C , так как за его пределами начинаются пики максимумов. Разделение показано на рисунке 2.2.8, соответственно межледниковый период – период, который располагается выше среднего значения.

Периоды, располагающиеся выше среднего значения, представляют собой периоды быстрых подъемов и быстрых падений температуры, но в рамках локальных циклов, составляющих общие циклы продолжительностью около 100 тысяч лет, из которых и состоит ход всей температурной кривой на протяжении всего промежутка в 800 тысяч лет.

Дискретность повлияла на амплитуду циклов с максимальным и достаточно быстрым потеплением, входящими в состав общих циклов, продолжительность которых около 100 тысяч лет.

Продолжительности и амплитуды периодов межледниковья различаются от цикла к циклу, что показано в таблице 2.2.2.

Таблица 2.2.2.

Характеристика периодов межледниковья ледникового керна проекта

EPICA

Номер цикла	Амплитуда, °С	Продолжительность
1	5.0	793876-758256 (35620)
2	2.3 3.7	739277-724233 (15044) 717625-679721 (37904)
3	4.7 2.2 4.5	628490-598667 (29823) 595959-585990 (9969) 582592-549855 (32737)
4	4.5	530357-470337 (60020)
5	3.9	419133-397676 (21457)
6	4.4	336098-324212 (11886)
7	3.2	244088-240843 (3245)
8	5.6	131592-117101 (14491)
9	н/д	н/д

Как показывает таблица 2.2.2, продолжительность межледниковых периодов за последние 350 тысяч лет составляет 10-20 тысяч лет., а также были включены циклы существенной продолжительности (более 10-20 тыс. лет),

которые располагаются в первые 450 тысяч лет, то есть в первой части температурного хода, и их продолжительность связана с высокой дискретностью. Последний 9ый цикл не учитывается в оценке продолжительности, так как он начался лишь чуть более 20 тысяч лет назад до точки отсчета (1950 год), поэтому судить о нем весьма некорректно из-за его неполноты.

Соответственно для первой части временного ряда среднее квадратическое отклонение (СКО) температуры периода межледниковья равно 1.3 °С, а для второй 1.0 °С.

Для сравнения результатов будет произведен подсчет продолжительности ледниковых периодов, который представлен в таблице 2.2.3.

Таб. 2.2.3

Характеристика ледниковых периодов керна проекта EPICA

Номер цикла	Амплитуда, °С	Продолжительность
1	2.6	761022-743325 (17697)
2	2.6	72400-718378 (5622)
3	2.6	675293-630645 (44648)
4	2.0	549855-530357 (17498)
5	3.1	469115-428868 (40247)
6	8.1	397267-336098 (61169)

7	8.2	324212-244088 (80124)
8	8.6	240751-131691 (109060)
9	9.0	117101-11573 (105528)

Ледниковые периоды, как показывает таблица 2.2.3, имеют гораздо большую продолжительность и их продолжительность возрастает от начала реконструкции температуры и до точки отсчета, достигая в продолжительности почти 100 тысяч лет. Продолжительность ледниковых периодов в первой половине температурного хода меньше в связи с дискретностью, так как большую часть забирают периоды межледниковья. СКО первой части ряда 0.1 °С, второй – 0.2 °С.

Следующей реконструкцией, межледниковый период которой будет рассмотрен, является исследование керна продолжительностью 715 тысяч лет на базе купола Фудзи. Как и при изучении проекта EPICA для разграничения периода межледниковья будет использована средняя температура, разделяющая циклы на межледниковье и ледниковые периоды, что показано на рис. 2.2.9.

Купол Фудзи (77.317 Ю.Ш., 39.703 В.Д.)
(d18O, формула Лорнуса)

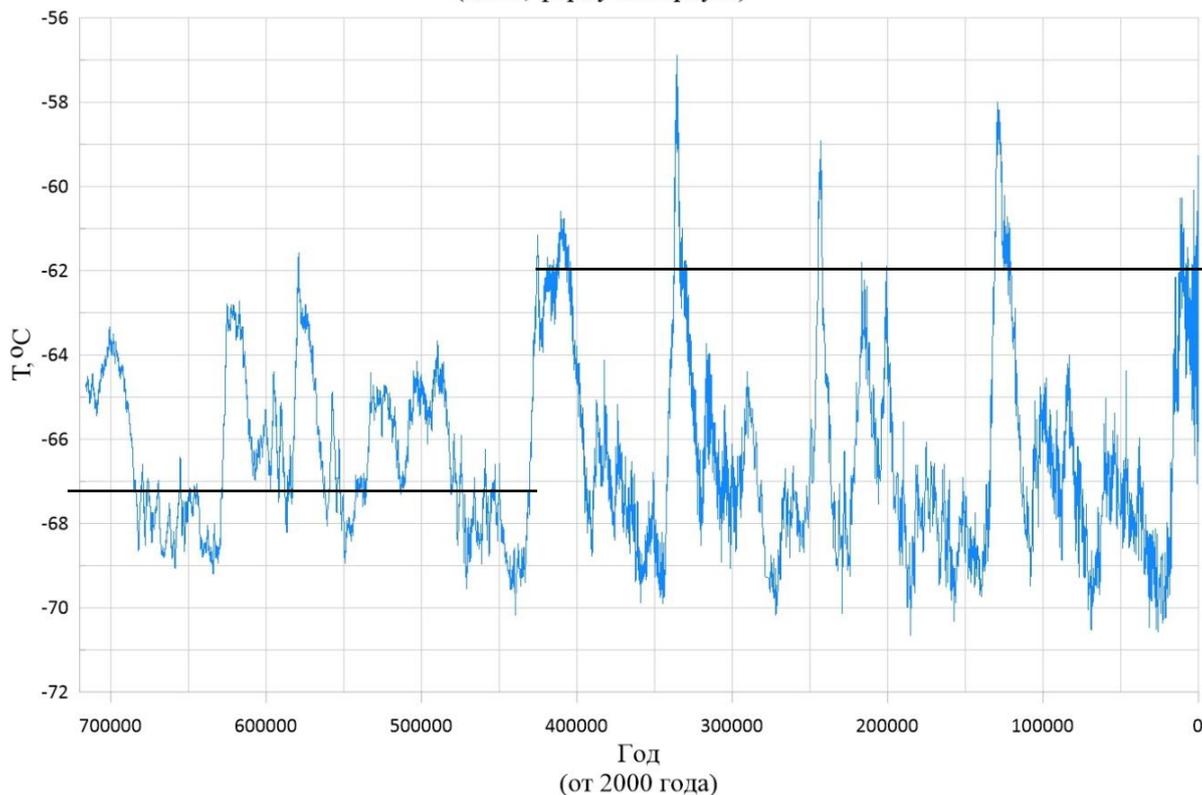


Рисунок 2.2.9. Линии температур, разделяющие периоды межледниковья и ледниковые периоды, на графике изотопных температур из проекта Купол Фудзи.

Средняя температура на реконструкции температурного хода на рисунке 2.2.9 составляет $-65.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и также как на рисунке 2.2.8 черной прямой линией отмечен уровень, выше которого располагаются периоды межледниковья. В данном случае он составил $-67.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в промежутке 715 - 430 тыс. лет и $-62.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в промежутке 430 тыс. и до точки отсчета (2000 год).

В межледниковье, как и в предыдущей реконструкции, входят в циклы представляющие собой резкие подъемы и более продолжительные падения и данные циклы являются максимумами и входят в состав циклов продолжительностью около 100 тысяч лет.

Дискретность повлияла на амплитуду циклов с максимальным и достаточно быстрыми потеплениями, входящими в состав общих циклов, продолжительность которых около 100 тысяч лет. Продолжительности и амплитуды периодов, попадающих в границы межледниковья, представлены в таблице 2.2.4.

Таблица 2.2.4.

Характеристика периодов межледниковья, полученных по ледниковому керну на базе купола Фудзи

Номер цикла	Амплитуда, °С	Продолжительность
1	3.0	715892-680710 (35182)
2	3.4 4.6	628281-588036 (42125) 583391-562632 (20759)
3	1.8	536512-480904 (55608)
4	1.4	425567-403528 (22039)
5	5.1	337237-329409 (7828)
6	3.1	244787-241756 (3031)
7	4.0	131099-120518 (10581)
8	н/д	н/д

Средняя продолжительность периодов межледниковья составляет 24644 лет. Периоды межледниковья приходятся на пики максимумов, представляющих собой отдельные циклы, входящие в состав основных циклов продолжительностью около 100 тысячи лет. Наибольшие продолжительности периодов межледниковья приходятся на первые 265 тысяч лет, что связано с высокой дискретностью в данном периоде времени.

Последний восьмой цикл не учитывается, так как он начался лишь около 20 тысяч лет назад от точки отсчета, составляющий в данном исследовании 2000 н.э. год. СКО первой части составляет 1.3 °С, второй – 2.4 °С

Для сравнения результатов, как и в предыдущем керне, произведен подсчет продолжительности ледниковых периодов, который представлен в таблице 2.2.5.

Таб. 2.2.5

Характеристика ледниковых периодов керна купола Фудзи

Номер цикла	Амплитуда, °С	Продолжительность
1	1.8	683538-628281 (55257)
2	0.9	588036-583391 (4645)
3	1.9	553600-541403 (12197)
4	2.9	475430-430329 (45101)
5	8.0	403528-337237 (66291)
6	8.2	329409-244787 (84622)

7	8.7	241756-131099 (110657)
8	8.5	120518-14712 (105806)

Ледниковые периоды, как показывает таблица 2.2.5, также как и в проекте EPICA, имеют гораздо большую продолжительность и их продолжительность возрастает от начала реконструкции температуры и до точки отсчета, достигая в 100 тысяч лет. Продолжительность ледниковых периодов в первой половине температурного хода меньше в связи с дискретностью, так как большую часть забирают периоды межледниковья. СКО первой части равно 1.9 °С, а второй – 0.1 °С.

2.3. Гренландия

В гренландском регионе для реконструкции температуры по ледяным кернам за образцы были взяты несколько научных проектов бурения на лед, проводившихся в Гренландии: GRIP, GISP2, NGRIP.

Рассмотрим результаты реконструкции, полученные на основе выше упомянутых исследований. Многолетний ряд температуры на рисунке 2.3.1, полученный по ледяной керну, принадлежит к проекту GRIP и имеет общую продолжительность 248802 года.

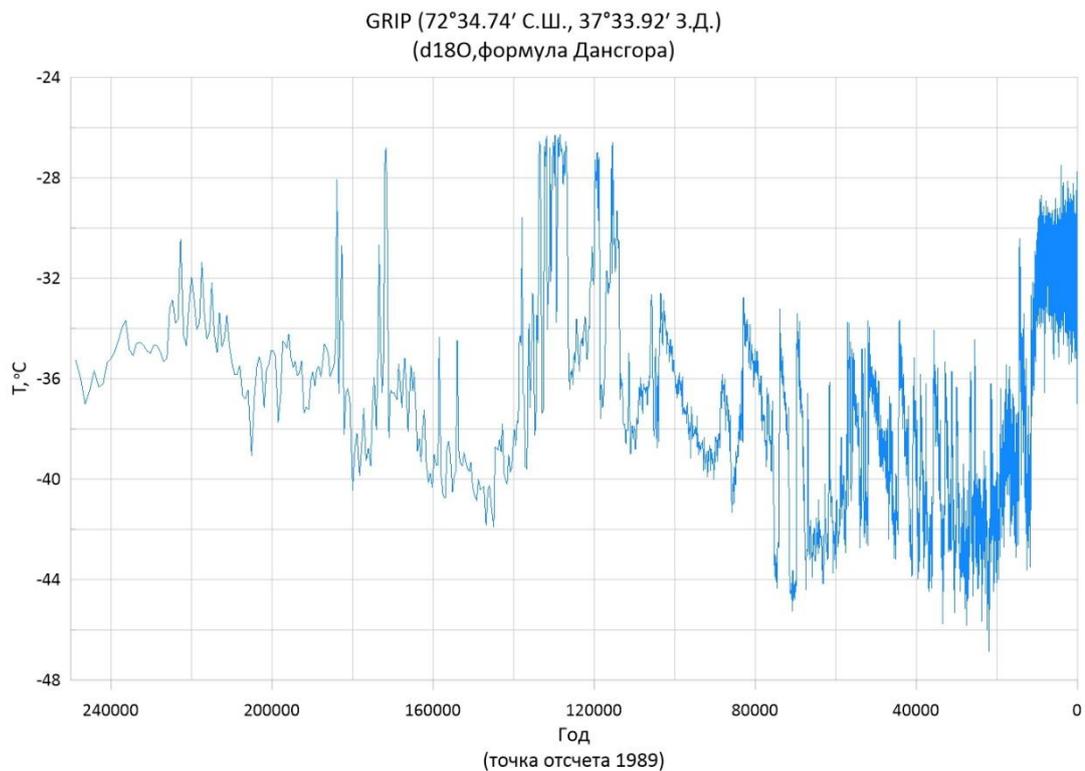


Рис. 2.3.1 Реконструированный временной ряд изотопной температуры из данных проекта GRIP

Реконструкция проводилась по трем методикам: глобальной формуле проекта МАГАТЭ, формуле Дансгора и формуле Дансгора-Йонсена. Основой для реконструкции температуры стал δO^{18} . В представленном ходе

температурной кривой выделяются 2 крупных цикла, продолжительность которых составляет 100-120 тыс. лет.

Поскольку продолжительность реконструкции составляет только 250 тыс. лет и рассмотрение лишь 2х циклов будет весьма некорректно, то дополнительно было проведено рассмотрение более коротких циклов, продолжительность которых составила около 60 тыс. лет.

Точность отображения информации уменьшается со временем, как и уменьшаются максимумы и минимумы, что опять же связано с увеличением дискретности, которая возрастает по мере углубления в прошлое, о чем свидетельствует рисунок 2.3.2.

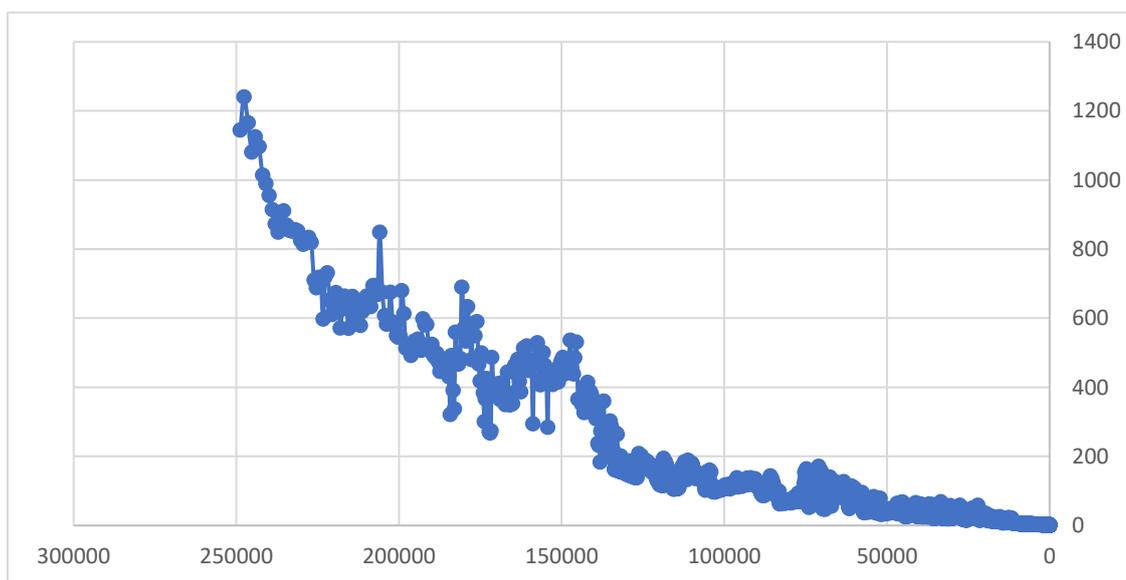


Рисунок 2.3.2. Изменение дискретности измерений изотопной температуры из данных проекта GRIP

Как видно из рисунка 2.3.2 наиболее точным является отображение только последних 150 тыс. лет, что связано с возрастающей дискретностью, влияющей на точность отображения информации. Ряд температуры полученный по данным проекта GRIP подразделяется на 2 больших цикла, продолжительностью около 100 тыс. лет каждый. Для отображения зависимости амплитуд цикла от дискретности построим 2 графика, по одному для каждого большого 100 тысячилетнего цикла, как показано на рис.2.3.3.

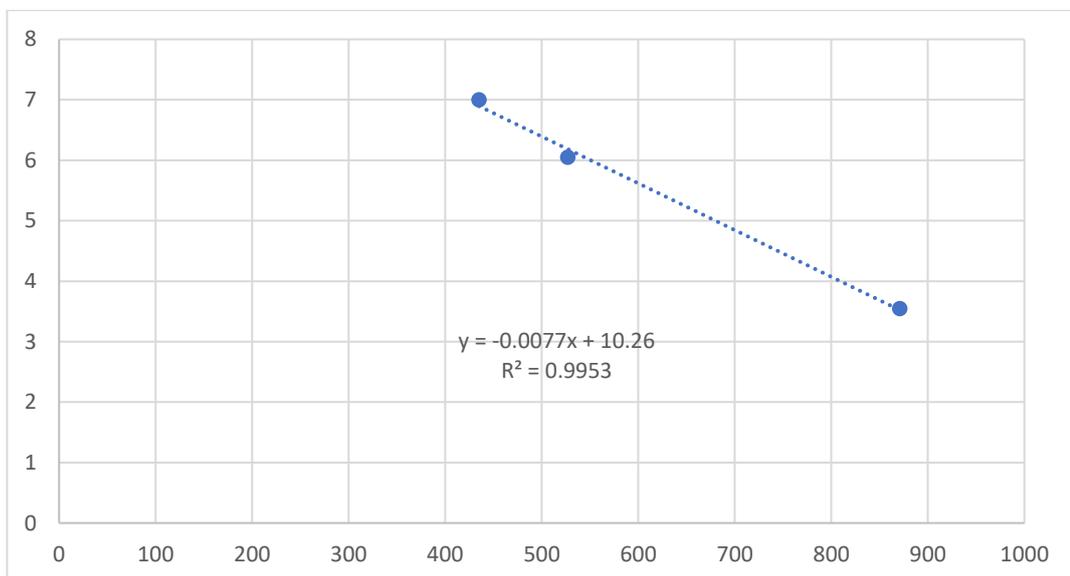
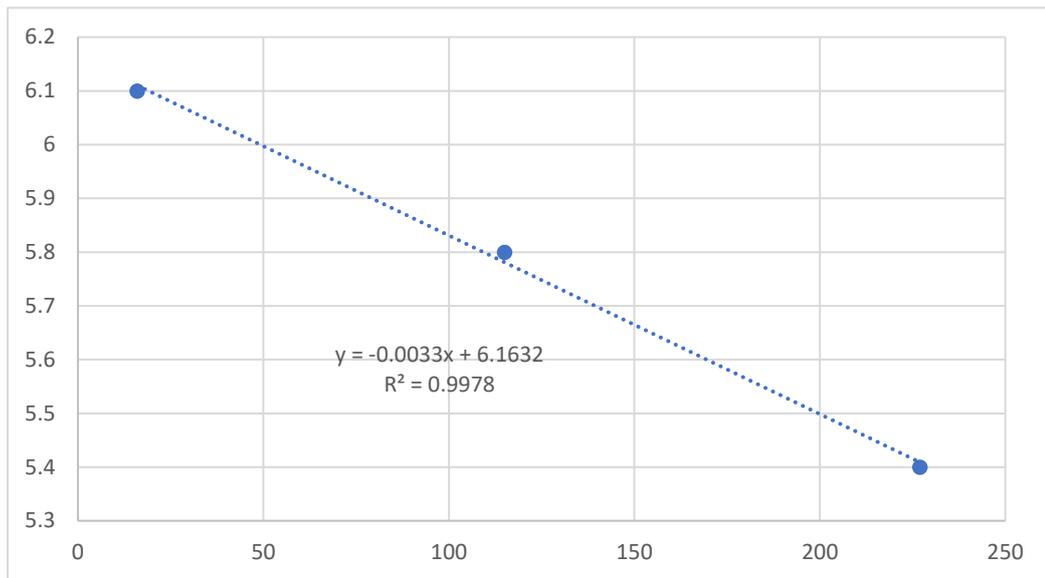


Рисунок 2.3.3. Зависимость амплитуд температур внутренних циклов (в °С) от дискретности (в годах) для проекта GRIP (вверху первый цикл 22-147 тыс. лет, внизу второй цикл 147-250 тыс. лет)

Таким образом, внутрициклические амплитуды циклов связаны имеют отличную связь со средней дискретностью. Однако, первая часть графика не может точно отображать поведение температуры из-за чрезмерно высокой дискретности.

Следующий многолетний ряд температуры полученный по ледяной керну/ принадлежит к проекту NGRIP и показан на рисунке 2.3.4,

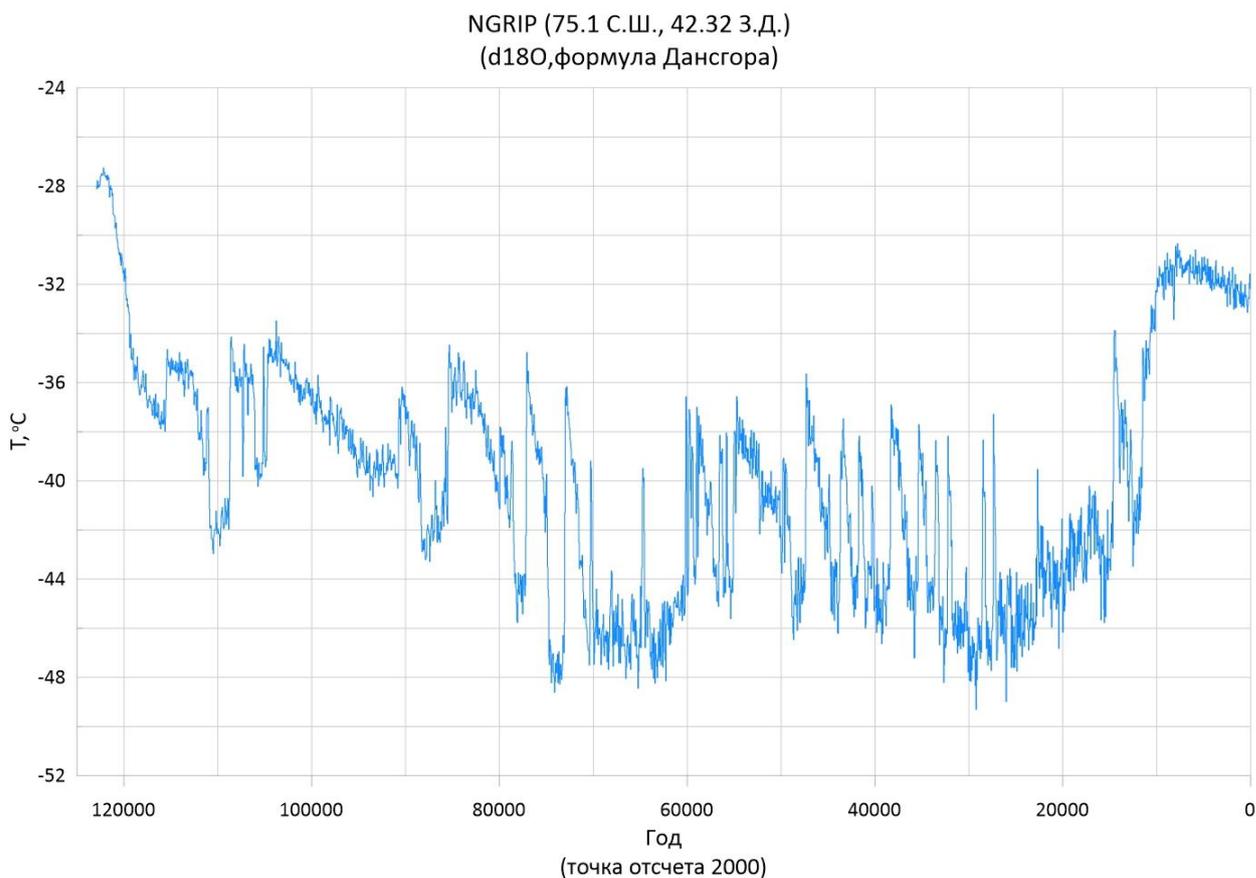


Рис. 2.3.4 Реконструированный временной ряд изотопной температуры из данных проекта NGRIP

Результаты реконструкции по проекту NGRIP представлены на рисунке 2.3.4 продолжительностью хода температурной кривой чуть более 120 тыс. лет. Данный отрезок представляет собой один большой цикл продолжительностью около 100 тыс. лет, а также включает в себя начало нового, начавшегося за 20-25 тыс. лет до точки отсчета, за которую принят 2000 год. Реконструкции проводились по δO^{18} с помощью 3 методик: глобальная формула в рамках проекта МАГАТЭ, формула Дансгора и формула Дансгора-Йонсена.

Особенностью керна является постоянная дискретность равная 50 годам, что позволяет доверять ходу температурной кривой. КERN был разбит на циклы продолжительностью около 20 тыс. лет, которых получено 11.

Еще один временной ряд изотопной температуры, полученной по проекту GISP2 приведен на рис.2.3.5.

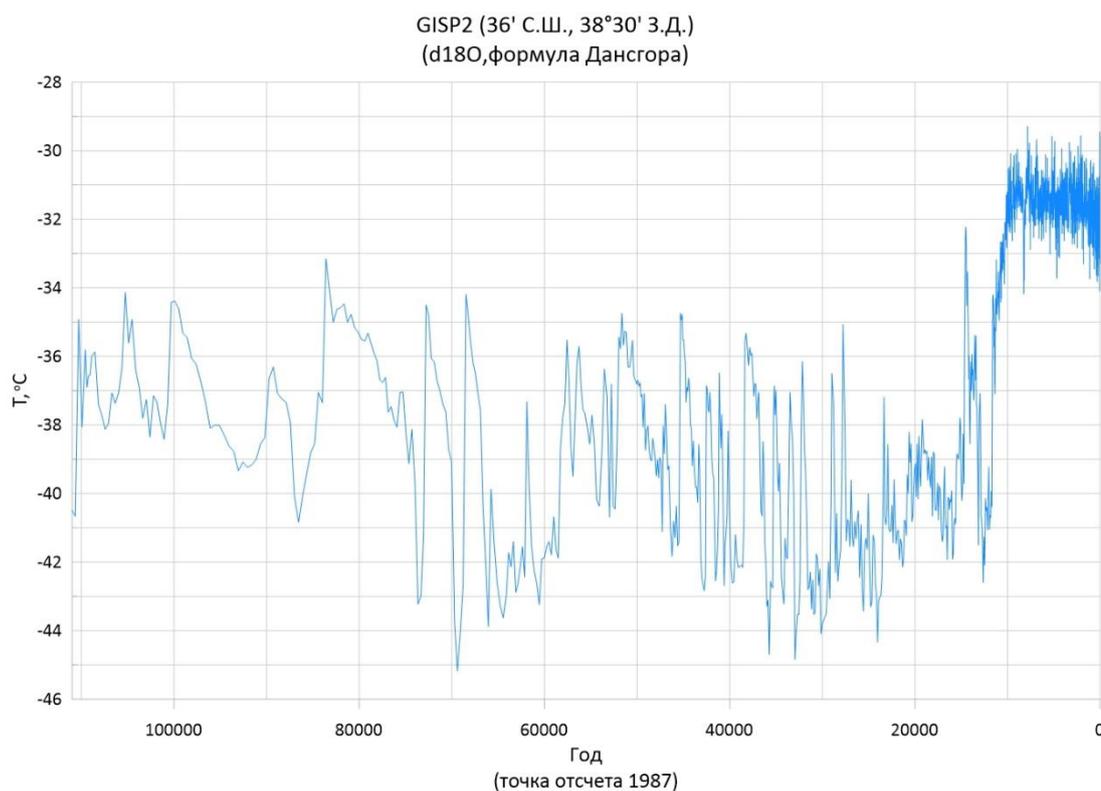


Рис. 2.3.5. Реконструированный временной ряд изотопной температуры из данных проекта GISP2

Проект GISP2 позволил восстановить палеотемпературу за период около 120 тыс. лет, которая реконструировалась по 3м формулам (глобальная, формулы Дансгора и Дансгора-Йонсона). Ряд представляет собой один большой цикл около 100 тыс. лет. За основу для реконструкции температуры был взят δO^{18} . Прослеживаются циклы продолжительностью 10-20 тыс. лет в основном 100 тысячилетнем цикле. За точку отсчета принят 1987 год.

Закономерность, присутствующая на графике 2.3.5 заключается в уменьшении повторяемости максимумов и минимумов, что связано с увеличением дискретности, представленной на рисунке 2.3.6.

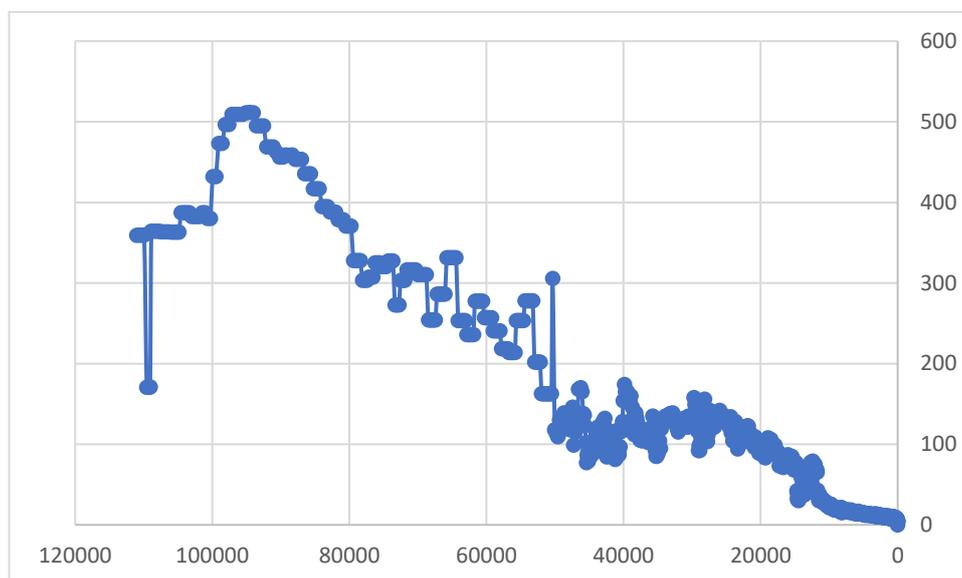


Рисунок 2.3.6. Изменение дискретности измерений изотопной температуры из данных проекта GRIP2

Исходя из выше представленного графика, наиболее точно отображена только вторая половина.

2.4. Горные ледники

Данный ледниковый керн представлен исследованием, проводившимся в Тибетских горах на леднике Джулия. Продолжительность реконструкции составила 132400 лет. За точку отсчета был принят 0 год. Ряд изотопной температуры приведен на рис.2.4.1.

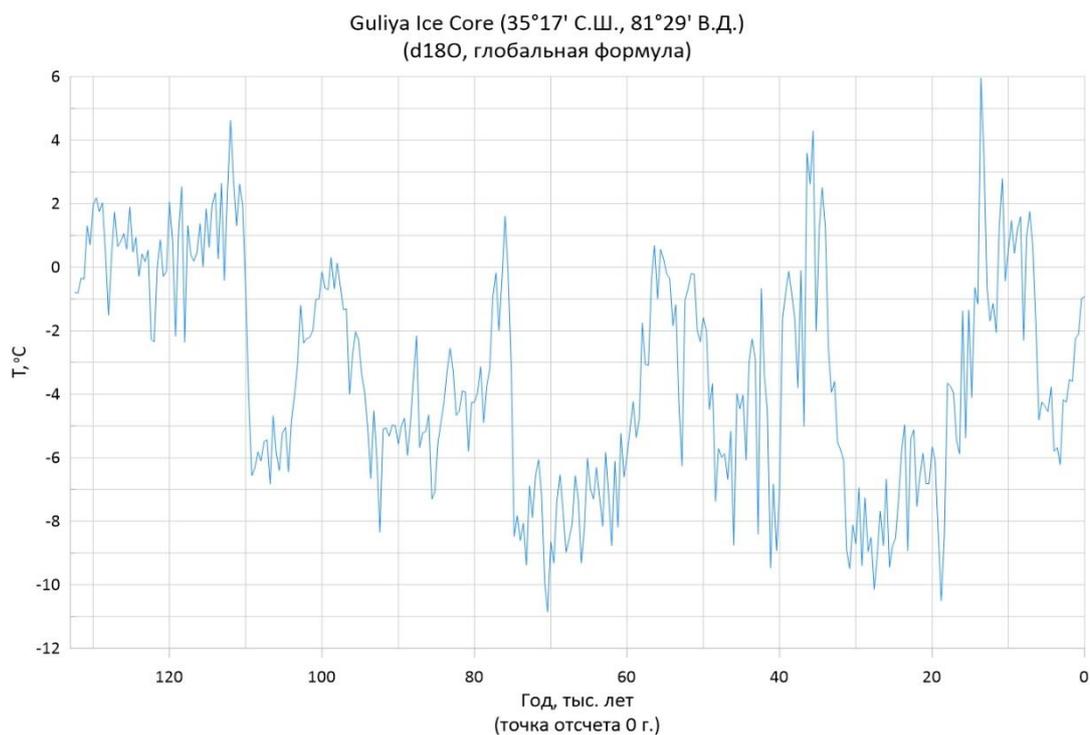


Рисунок 2.4.1 Реконструированный временной ряд изотопной температуры на леднике Джулия

На рис.2.4.1 наблюдаются циклы продолжительностью около 20 тыс. лет количеством 6. Имеется тенденция к падению с непродолжительными очагами роста температур, данный ряд температурной кривой укладывается в 100 тысячелетний цикл роста и падения температуры. Реконструкция температуры проводилась с помощью глобальной формулы в рамках проекта МАГАТЭ, за основы был взят δO^{18} .

Дискретность на данном керне постоянная и составляет 400 лет, таким образом выдерживается общая картина циклов, но ход температурной кривой менее подробный.

Основной промежуток в 100 тысяч лет в общих чертах совпадает и умещается в один большой 100 тысячилетний цикл, который прослеживался в Антарктиде и Гренландии, но в данном случае его особенностью является то, что прослеживаются циклы в 50 тысяч в промежутках между 120-70 тыс. лет и 70-20 тыс. лет.

2.5. Сопоставление результатов

На всех реконструкция температурного хода кривой имеется общая тенденция к повторяемости циклов продолжительностью около 100 тысяч лет, начало которых сопровождается резким подъемом среднегодовой температуры. После прохождения максимума начинается резкое падение, сопровождающееся циклами роста, но в конечном счете система приходит к определенному минимуму, после которого следует начало нового цикла и данная ситуация снова повторяется. Однако такая картина просматривается только в Антарктиде, в связи с наличием в данном регионе кернов продолжительностью несколько сотен тысяч лет. В Гренландии и горных ледниках можно довольствоваться лишь отрезками за последние 120 тысяч лет, но и на них видно что реконструированная температурная кривая достигает минимума приблизительно к 20 тысячам лет до точки отсчета, после которой начинается резкий подъем, свидетельствующий о начале нового температурного цикла.

Циклы продолжительностью около 100 тысяч лет не представляют собой однородную картину с плавными переходами от максимумов к минимумам, а сопровождаются своими подъемами и спадами, а то и вовсе стагнируют.

Продолжительность общих циклов не является строго ориентированной на промежутки в одну сотню тысяч лет, а варьируется от 70 до 130 тысяч лет.

Свои неточности вносит дискретность, которая в некоторых случаях возрастает чуть ли не по экспоненте, а в других остается постоянной, но с достаточно большим шагом, например, в леднике Guliya, оставаясь на всем промежутке в сто двадцать тысяч лет неизменной и равной четырем сотням лет. Данные неточности представляют собой потери в максимумах и минимумах, а также в общем ходе температурной кривой, что приводит к занижению амплитуд циклов и, в некотором роде, их продолжительности. Соответственно, чем дальше в прошлое мы погружаемся, тем менее ярко выражаются колебания и появляется тенденция к их затуханию. Результатом становится недостоверность реконструированного хода температурной кривой по причине сглаживания множества подциклов и занижением максимумов, лишь прослеживается только общая тенденция в присутствии циклов длиной в среднем в 100 тысяч лет.

Другой немаловажной особенностью является величина изменения температуры в зависимости от региона, выраженная в циклах, наибольшая наблюдается в Гренландии и гималайском леднике Guliya, а наименьшая в Антарктиде, что можно объяснить особенностями данных регионов.

Общие циклы продолжительностью около 100 тысяч лет прекрасно сопоставляются с эксцентриситетом планеты Земля, изменения которого за последний миллион лет представлены на рисунке 2.5.1.

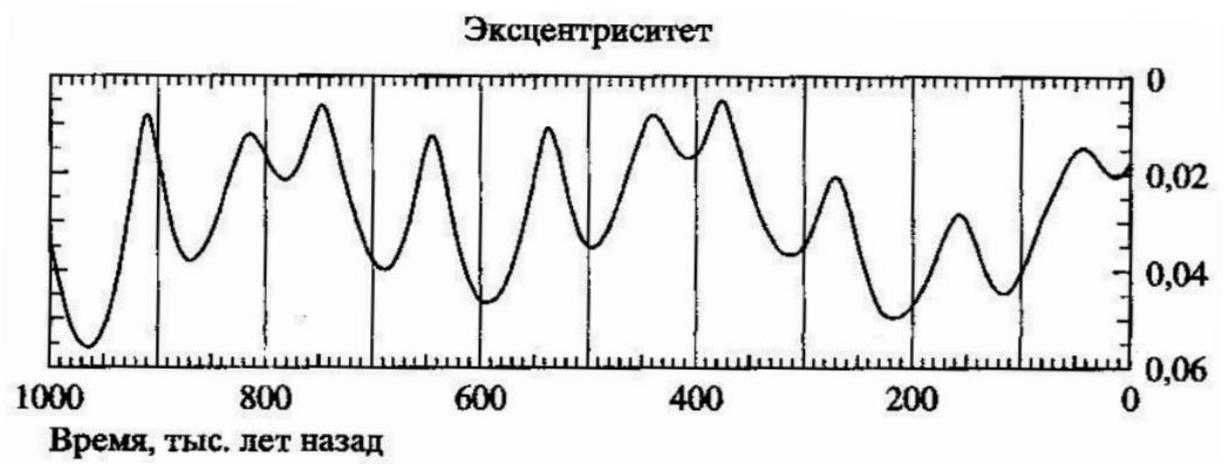


Рисунок 2.5.1. Динамика эксцентриситета Земли

3. Оценка климатических изменений за последние десятки тысяч лет

3.1. Обзор климатического периода

Рассматриваемый период принадлежит к позднему плейстоцену. Период характеризовался как мощная экспансия многолетней мерзлоты. Именно современная вечная мерзлота начала формироваться в период четвертичного оледенения.

Период характеризуется как позднеледниковье и эта эпоха отличалась рядом похолоданий океана, которые осуществлялись асинхронно: в полярных континентальных областях 30-25 тысяч лет назад; в экваториальной зоне океана 24-20 тысяч лет назад; 19-15 тысяч лет назад похолодание охватило континенты, где выразилось в виде резкого возрастания масштабов горного оледенения и образования покровных ледников умеренных широт; в высоких широтах океана похолодание произошло 14-12 тыс. лет назад, где увеличились площади морских льдов.

Около 15 тысяч лет назад ледниковый щит начинает разрушаться и отступает в сторону полюсов. За отступлением ледникового покрова мигрировала флора и фауна.

По временным представлениям поздний плейстоцен заканчивается в самом начале голоцена, то есть примерно 12-10 тысяч лет назад. Период характеризовался исчезновением неповторимых ландшафтов тундростепи, что привело к сокращению и вымиранию целых ареалов многих животных. Как отмечал Б. Джон, данное вымирание по масштабам превосходило даже современное истребление многих видов животных человеком за все времена его существования.

3.2. Антарктида

Антарктический регион представлен данными исследований с Купола С, станцией Земля королевы мод и Базой Холмы патриот.

Ледяной керн на рисунке 3.2.1 имеет продолжительность 40 тысяч лет.

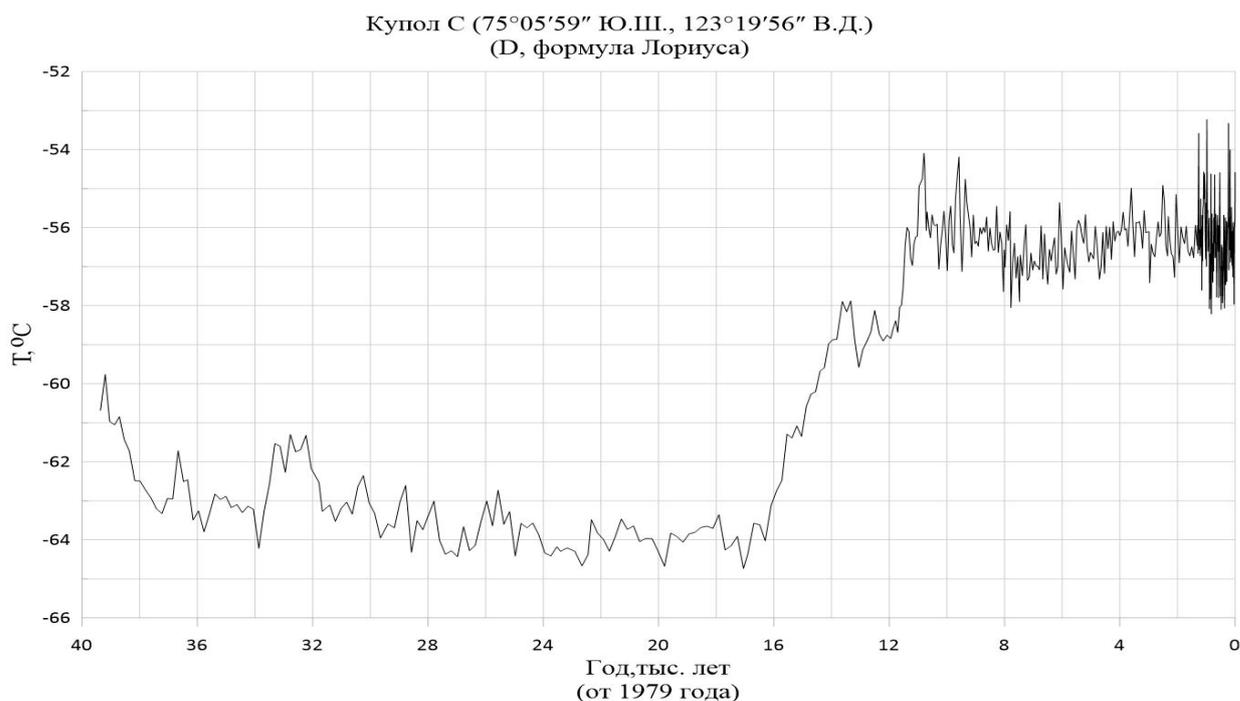


Рисунок 3.2.1. Реконструированный временной ряд изотопной температуры по ледяному керну Купос С

Реконструкция проводилась с помощью двух формул (формула Лориуса и глобальная формула в рамках проекта МАГАТЭ). В качестве индикаторов для реконструкции были взяты δO^{18} и δD . За точку отсчета принят 1979 год. Наиболее точно представлены последние 16 тысяч лет так как дискретность возрастает со временем погружения в прошлое, как показано на рис.3.2.2.

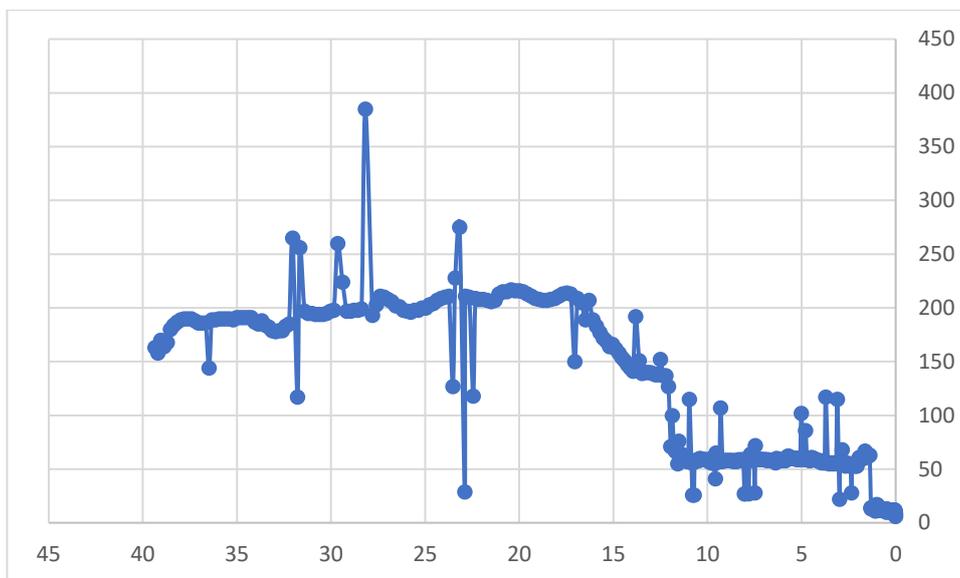


Рис. 3.2.2. Изменение дискретности измерений изотопной температуры из данных проекта Купос С

Как следует из рис.3.2.2, дискретность резко повышается с 12 тыс. лет и возрастает до 200 лет в среднем, а до этого среднее значение составляло 50 лет. Таким образом последние 12 тысяч лет имеют наибольшую точность.

Особенностью является резкий переход к голоцену, начавшийся за 16 тысяч лет до точки отсчета, который сопровождался своими подъемами и падениями. Последние 10 тысяч лет прошли без особых резких изменений. Промежуток в 16-40 тысяч лет сопровождается постепенным спадом температуры, обозначая тем самым конец 100 тысячелетнего цикла, но подробно рассмотреть упомянутый промежуток не представляется возможным из-за высокой дискретности.

В связи с этим посчитаем параметры перехода, результат представим в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1.

Характеристики подъема температур по данным купола С

Участок, тыс. лет	Скорость, оС/100 лет	Max	Min
17.055-16.3	+0.2	-63.6	-64.7
16.3-15.04	+0.2	-61.4	-64.0
15.04-13.06	+0.1	-57.9	-61.4
13.06-12.21	+0.2	-58.1	-59.6
12.21-11.198	+0.2	-56.0	-58.9
11.198-10.573	+0.2	-54.1	-57.0

Участки на кривой подъема выделялись на основе наличия циклов в подъеме при этом скорость подъема практически не изменяется составляя +0.2 °С/100 лет.

Количество членов = 55

Фишер = 1.635

Стьюдент = 6.208

Диксон Максимум (средний) = 0.061

Диксон Минимум (средний) = 0.062

Следующий временной ряд изотопной температуры получен по керну в проекте Земля Королевы Мод и представлен на рис.3.2.3.

Земля Королевы Мод (71.34 Ю.Ш., 11.59 В.Д.)
($\delta^{18}\text{O}$, формула Лориуса)

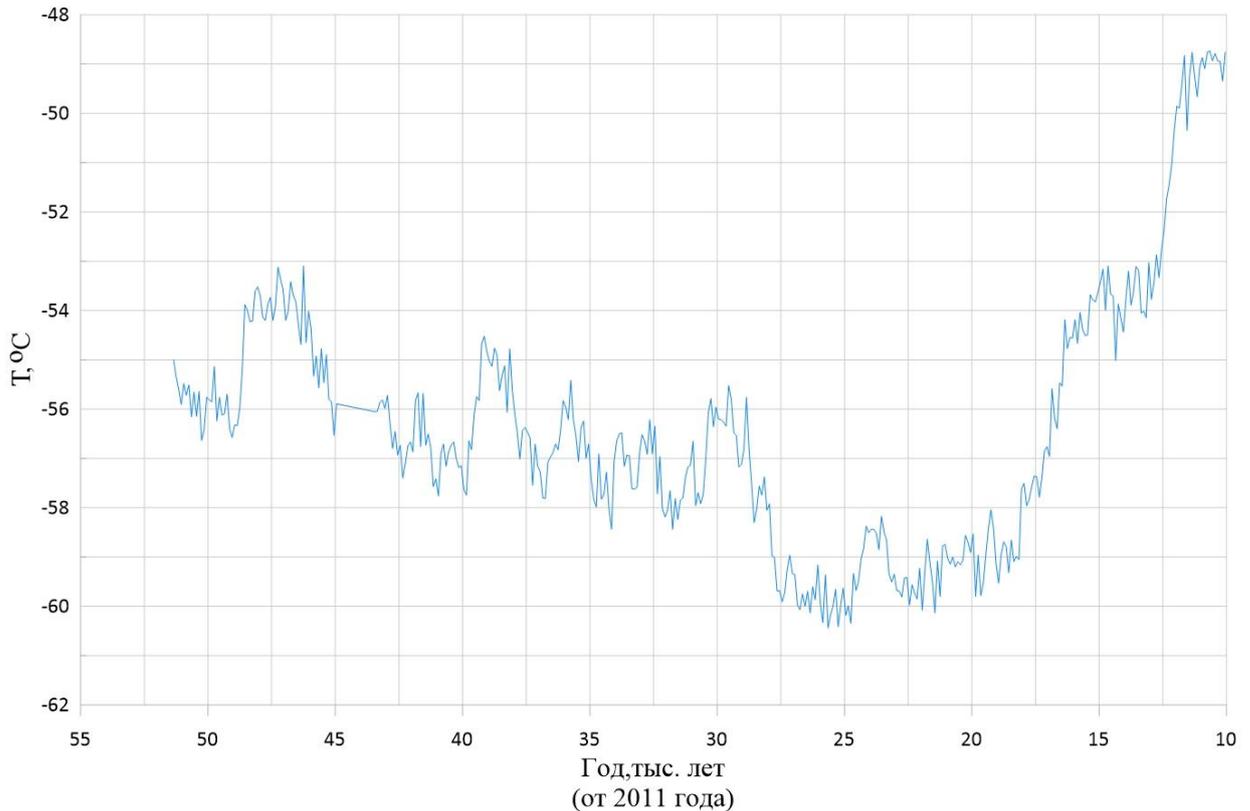


Рисунок 3.2.3. Реконструированный временной ряд изотопной температуры по ледяному керну Земля Королевы Мод

Керн, полученный на станции Земля королевы Мод, имеет продолжительность 52 тысячи лет. В качестве основы для реконструкции был взят δO^{18} и использована глобальная формула в рамках проекта МГАТЭ и формула Лориуса. Точкой отсчета считается 2011 год

Дискретность остается неизменной на всем участке хода кривой температуры и составляет 100 лет.

Однородность дискретности позволяет четко выделять четкие циклы в 5-10 тысяч лет. Ход температурной кривой как раз попадает на конец 100 тысячелетнего цикла с общей тенденцией к понижению температуры, впоследствии наблюдается рост температуры к голоцену, начало роста начинается в за 20 тысяч лет до точки отсчета.

Рассмотрим участки перехода к голоцену, параметры которых приведены в таблице 3.2.2.

Таблица 3.2.2.

Характеристики подъема температуры при переходе к голоцену в точке
Земля Королевы Мод

Участок, тыс. лет	Скорость, оС/100 лет	Max	Min
21.45-19.65	+0.03	-58.6	-60.1
19.65-18.15	+0.22	-58.0	-59.8
18.15-14.35	+0.11	-53.1	-59.1
14.35-10.05	+0.14	-48.8	-55.0

Количество членов = 115

Фишер = 1.657

Стьюдент = 15.574

Диксон Максимум (средний) = 0.014

Диксон Минимум (средний) = 0.042

Еще один временной график изотопной температуры по станции База холмы Патриоты приведен на рис.3.2.4.

База холмы Патриоты (80.3 Ю.Ш., 81.35 З.Д.)
(D, формула Лориуса)

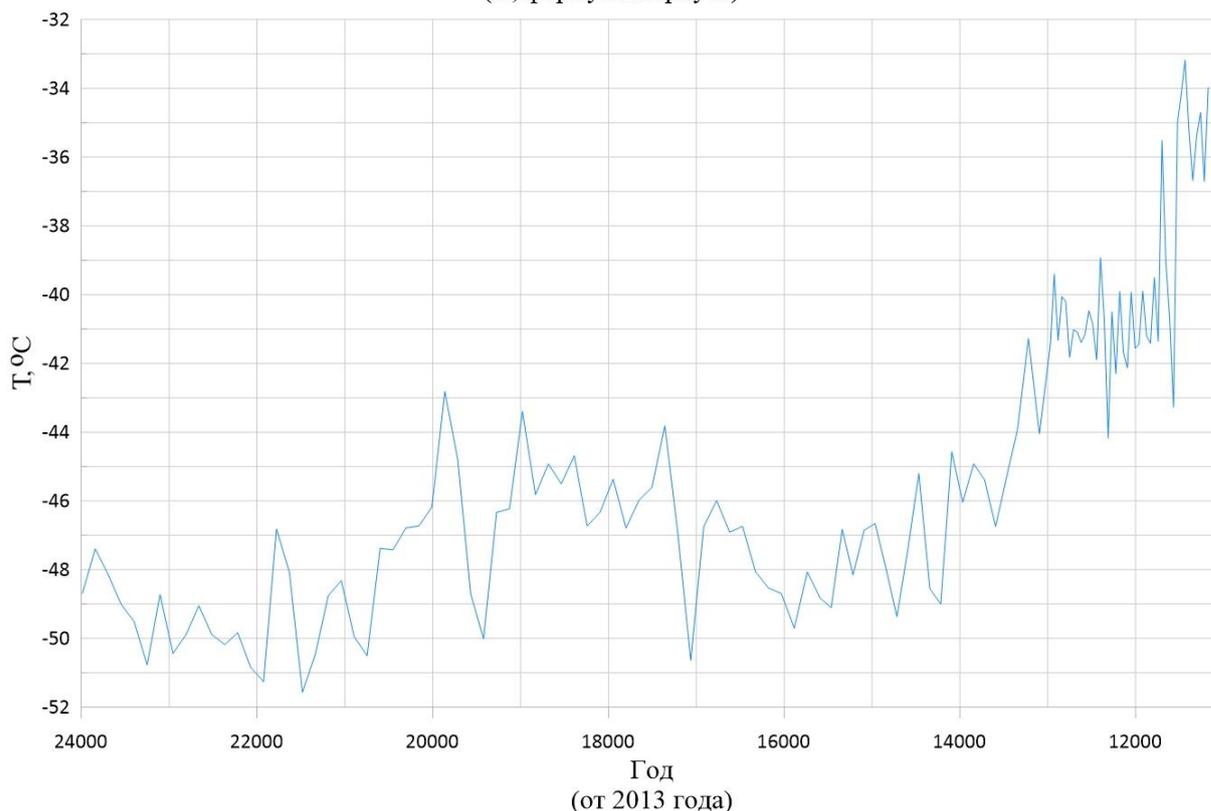


Рис. 3.2.4. Реконструированный временной ряд изотопной температуры по ледяному керну по станции База холмы Патриоты

Данный керн представляет собой участок продолжительностью 14 тысяч лет, основой реконструкции выбран δD и две формулы, а именно формула Лориуса и глобальная формула по проекту МАГАТЭ. Точкой отсчета является 2013 год.

Дискретность возрастает скачкообразно, что несколько сглаживает амплитуды циклов (рис.3.2.5).

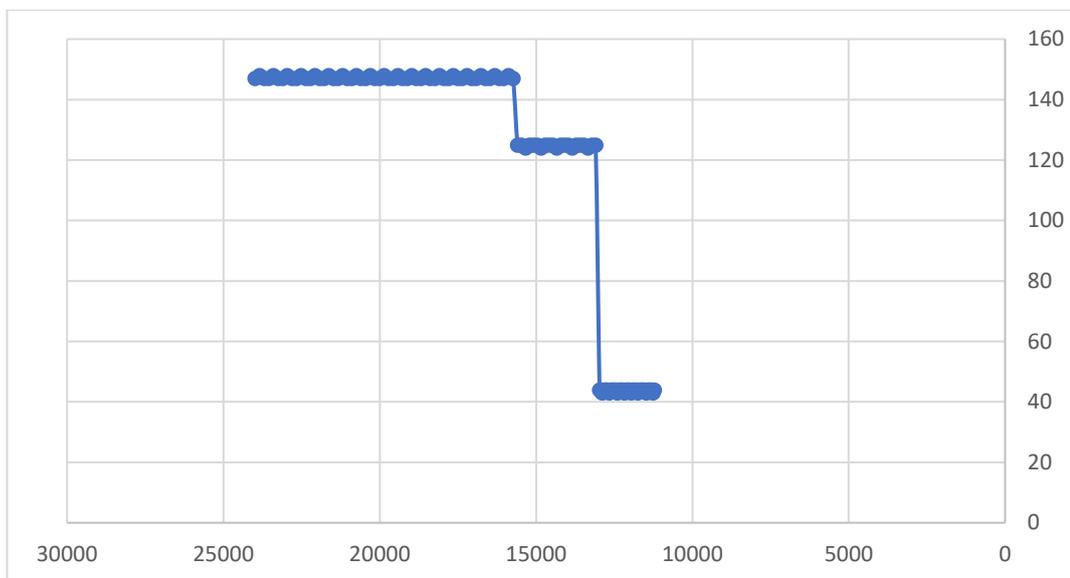


Рис. 3.2.5. Изменение дискретности измерений изотопной температуры из данных станции База холмы Патриоты

Здесь также наблюдается переход к голоцену, выраженный в резком росте температуры между периодом 16-10 тысяч лет назад. Характеристика перехода представлена в таблице 3.2.3.

Таблица 3.2.3.

Характеристики подъема температуры в точке База холмы Патриоты

Участок, тыс. лет	Скорость, оС/100 лет	Max	Min
15.885-14.218	+0.04	-45.2	-49.7
14.218-13.095	+0.45	-41.3	-49.0
13.095-12.313	-0.01	-38.9	-44.2
12.313-11.586	+0.13	-35.5	-43.3
11.586-11.174	+2.33	-33.2	-43.3

Количество членов = 65

Фишер = 1.217

Стьюдент = 7.044

Диксон Максимум (средний) = 0.056

Диксон Минимум (средний) = 0.030

3.3. Гренландия

Гренландия в данном временном промежутке представлена тремя проектами: GISP2, GRIP и NGRIP. Продолжительность температурных рядов составила 18-45 тыс. лет. Временной график изотопной температуры по проекту NGRIP приведен на рис.3.3.1.

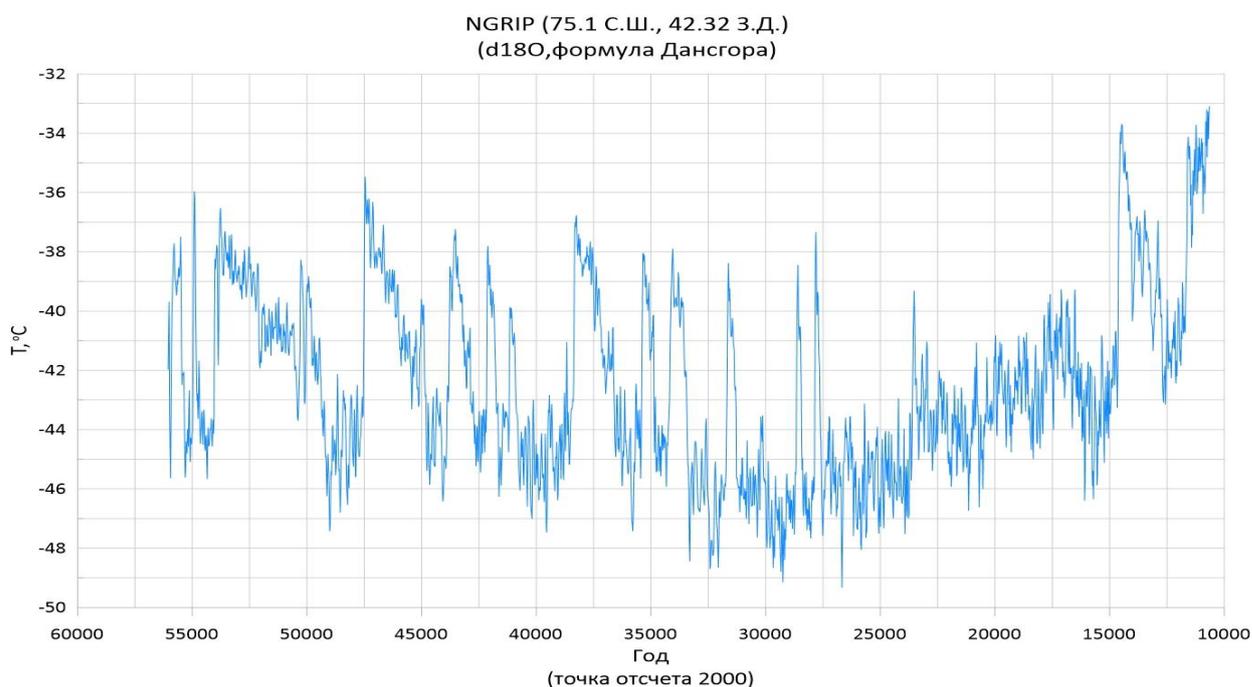


Рис 3.3.1. Реконструированный временной ряд изотопной температуры по ледяному керну по проекту NGRIP

Данный керн (рис.3.3.1) принадлежит к проекту NGRIP, продолжительность которого составляет 46 тысяч лет. Временной промежуток 10650-56050 лет от точки отсчета, определённой как 2000 год. Реконструкция проводилась на основе δO^{18} с помощью формул: глобальная (в рамках проекта МАГАТЭ), формула Дансгора и формула Дансгора-Йонсена. Данный образец на рисунке 3.3.1 представлен на основе формулы Дансгора.

Дискретность на всем промежутке составляет 20 лет, что достаточно точно отображает колебание температурной кривой на выбранном промежутке.

Из температурного хода видно, что в начале температурной кривой наблюдается падение среднегодовой температуры, сопровождающаяся циклами подъема и спада температуры, средняя продолжительность которых около двух с половиной тысяч лет. И с даты 26670 до точки отсчета начинается переход к голоцену, сопровождающийся довольно быстрым подъемом в 15 тысяч лет, но разумеется, присутствуют свои локальные падения среднегодовой температуры.

Расчетные характеристики подъема температуры представлены в таблице 3.3.1.

Таблица 3.3.1.

Характеристики подъема в точке NGRIP

Участок, тыс. лет	Скорость, оС/100 лет	Max	Min
26.670-23.905	+0.06	-43.0	-49.3
23.905-21.105	+0.03	-39.3	-47.5
21.105-16.090	+0.006	-39.3	-46.7
16.090-12.570	+0.09	-33.7	-46.4
12.570-10.650	+0.53	-33.1	-43.1

Количество членов = 502

Фишер = 5.110

Стьюдент = 16.535

Диксон Максимум (средний) = 0.010

Диксон Минимум (средний) = 0.030

Временной график изотопной температуры по проекту GRIP приведен на рис.3.3.2.

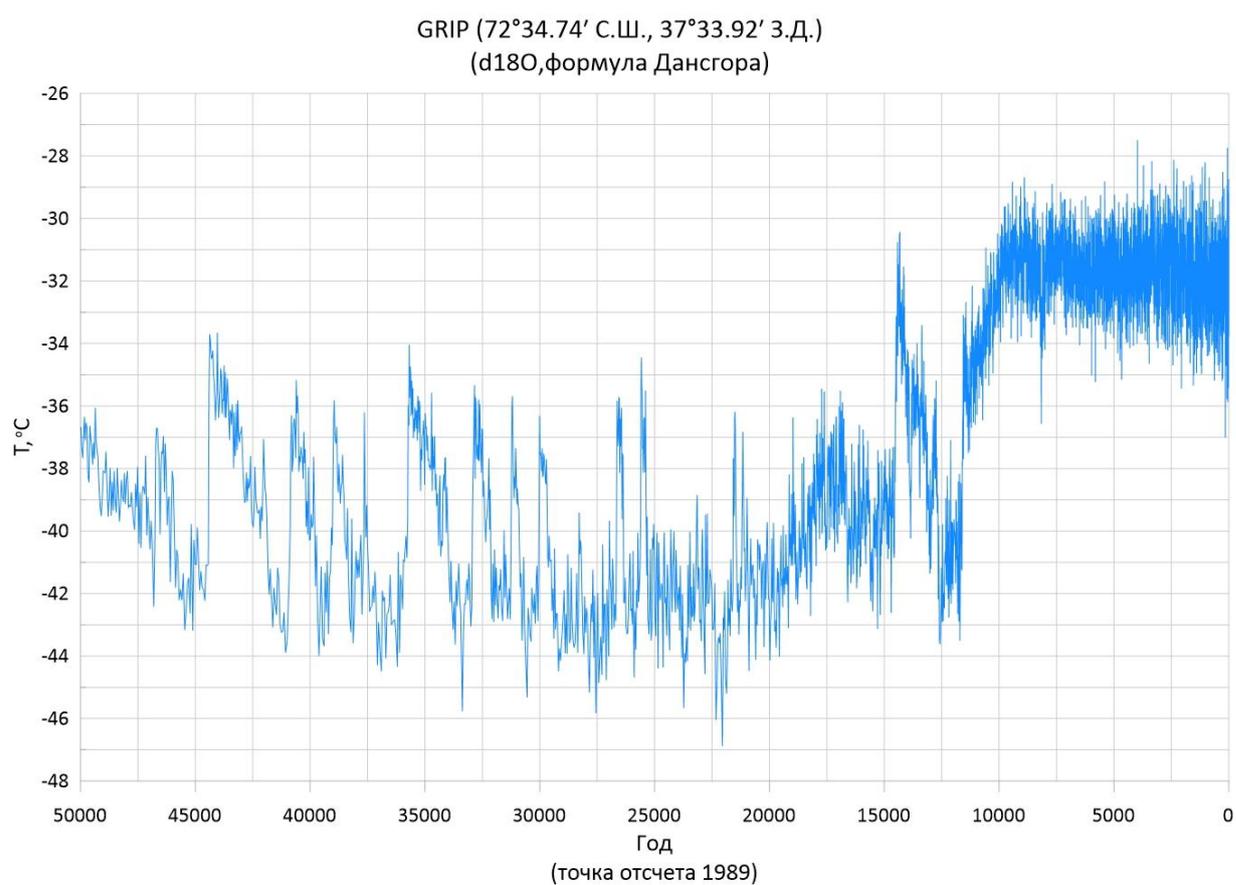


Рисунок 3.3.2. Реконструированный временной ряд изотопной температуры по ледяному керну по проекту GRIP

Данный проект GRIP взят для рассмотрения последних 50 тысяч лет, так как обладает достаточно хорошей дискретностью. О методах реконструкции и применяемых формулах, а также о дискретности данного графика, говорилось в предыдущей главе.

До последнего подъема температуры наблюдаются циклы продолжительностью около 5 тысяч лет, но общий тренд является понижающимся до 22 тысяч лет от точки отсчета и после данной даты начинается подъем, а именно переход к голоцену. Переход сопровождается своими локальными подъемами и локальными спадами.

Последние 8 тысяч лет не проявляют каких-либо существенных циклов или продолжительных циклов с резкими переходами, такими как наблюдались до перехода к голоцену.

Рассмотрим характеристики перехода, представленные в таблице 3.3.2

Таблица 3.3.2.

Характеристики подъема в точке GRIP

Участок, тыс. лет	Скорость, оС/100 лет	Max	Min
22.049-20.891	+0.22	-36.2	-46.9
20.891-15.290	+0.03	-35.5	-44.5
15.290-12.573	-0.02	-30.4	-43.6
12.573-8.165	+0.16	-28.7	-43.6
8.165-7.502	+0.08	-29.5	-36.6

Количество членов = 1300

Фишер = 3.034 н/о 1.560

Стьюдент = 54.297 н/о 1.983

Диксон Максимум (средний) = 0.009 н/о

Диксон Минимум (средний) = 0.076 н/о

Временной график изотопной температуры по проекту GISP2 приведен на рис.3.3.3.

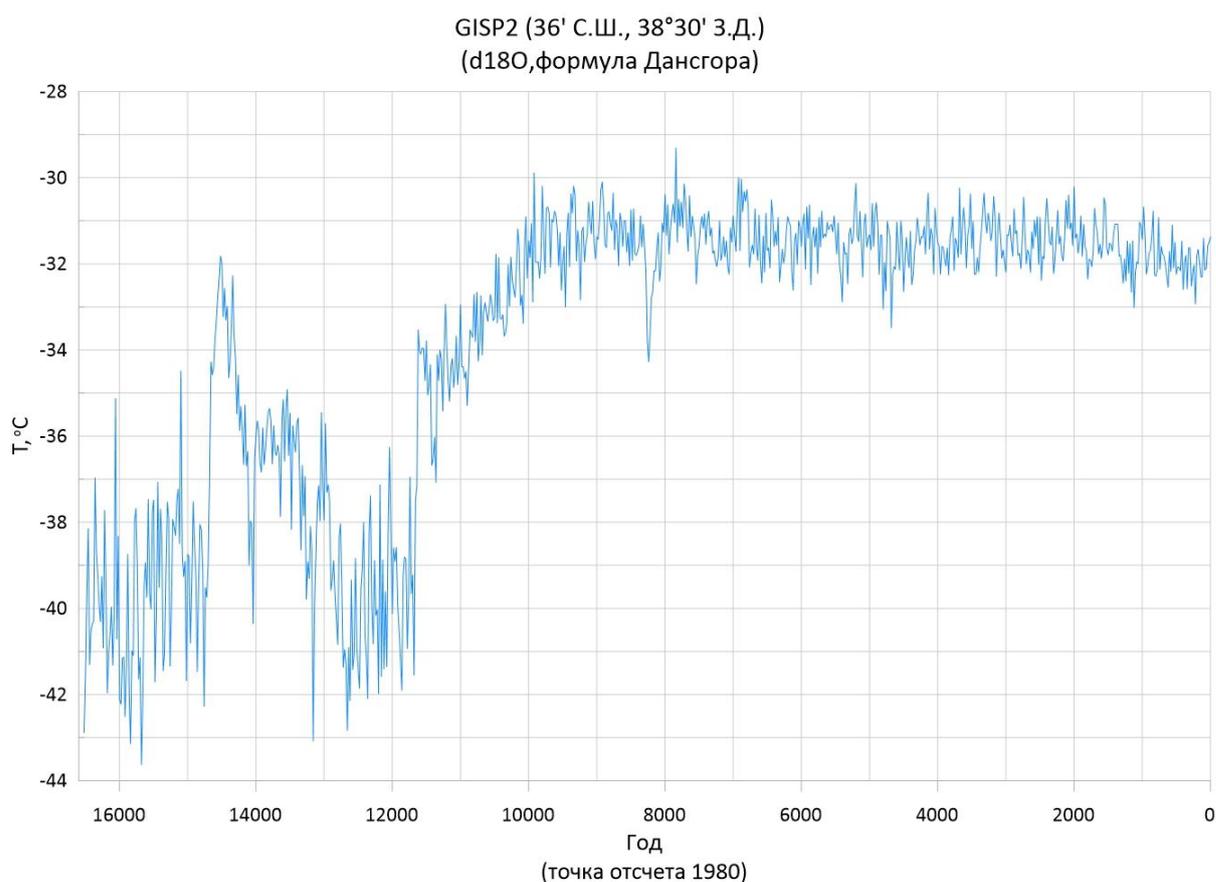


Рисунок 3.3.3. Реконструированный временной ряд изотопной температуры по ледяному керну по проекту GISP2

Данный ход температурной кривой был получен в рамках проекта GISP2, в основе реконструкции лежал δO^{18} , а реконструкция проводилась с помощью следующих формул: глобальная (в рамках проекта МАГАТЭ),

формула Дансгора и формула Дансгора-Йонсена. Продолжительность полученного хода температурной кривой составила 16520 лет.

Дискретность на всем промежутке исследуемого участка постоянна и составляет 20 лет.

Представленный период показывает последний подъем температуры. Данный подъем – переход к голоцену, как видно из графика рис.3.3.3 сопровождается своими подъемами и спадами температуры.

За последние 8 тысяч лет не проявляются масштабные циклы, которые имели место быть до этой даты, что делает данный период условно стационарным.

Характеристики подъема представлены в таблице 3.3.3

Таблица 3.3.3.

Характеристики подъема в точке GISP2

Участок, тыс. лет	Скорость, оС/100 лет	Max	Min
16.520-14.760	+0.04	-34.5	-43.6
14.760-13.160	-0.05	-32.0	-43.1
13.160-11.608	+0.1	-35.5	-43.1
11.608-8.240	+0.21	-41.5	-29.9

Количество членов = 827

Фишер = 34.184

Стьюдент = 24.696

Диксон Максимум (средний) = 0.047

Диксон Минимум (средний) = 0.044

3.5. Сопоставление результатов

Последние десятки тысяч лет представляют собой картину завершения последнего цикла в 100 тысяч лет и начало нового, начинающегося в промежутке от 27 до 20 тысяч лет от точки отсчета. Начало нового цикла в сто тысяч лет похоже на все остальные циклы в 100 тысяч лет, рассмотренные в предыдущей главе на примере Антарктиды.

Максимум последнего цикла достигается в голоцене, что составляет дату в 10 тысяч лет до точки отсчета. Таким образом, в дальнейшем ожидается тренд похолодания, который может быть сглажен антропогенным воздействием человека на глобальную температуру Земли.

Сам подъем не был однородным и сопровождался также падением температуры и её подъемом. Неточность в последние десятки тысяч лет вносит та же самая дискретность, которая сглаживает циклы, но на данном промежутке во всех ледниковых ядрах она держится на уровне десятков лет и начинает увеличиваться лишь после 20 тысяч лет до точки отсчета, что в достаточной степени хорошо показано на примере Антарктиды в реконструкции на основе «Купола С».

После прохождения максимума в голоцене начинается период стационарности, если рассматривать его на периоде в 100 и более тысяч лет.

И заключительной закономерностью можно назвать отклик на изменения, ведь в разных частях света, в данном случае Антарктида и Гренландия, он происходит практически синхронно и его величина зависит только от дискретности на заданном участке. Это еще раз подтверждает то, что

максимумы и минимумы циклов могут быть реконструированы некорректно из-за разной дискретности.

Последние 100 тысяч лет представляли собой тренд падения температуры до 20 тысяч лет от точки отсчета в ледниковых кернах, после которого начинался тренд подъема температуры, подъем сопровождался своими частными подъемами и падениями температурного хода кривой. Переход заканчивался около 10 тыс. лет до точки отсчета, а с 8 тыс. лет до точки отсчета колебания становятся условно стационарными.

4. Оценка климатических изменений за последние 2 тысячи лет

4.1. Обзор климатического периода

Рассматриваемый период является частью голоцена, находящегося на стадии субатлантического. Сам голоцен начался примерно 12 тысяч лет назад, хотя граница немного неточна, с разницей в примерно около 100 лет, хотя повсеместный переход начался не синхронно.

Этот период является современной геологической эпохой и эпохой, в которую начались инструментальные метеорологические наблюдения.

Сам субатлантический период, который продолжается и по сей день, характеризуется температурными колебаниями, которые приводят к экологическим эффектам, в свою очередь оказывающих воздействие на жизнь и деятельность людей.

Субатлантический период начался с 500 года до н.э., когда завершившись похолодание железного века и связан с началом римского климатического оптимума, продолжавшегося до 3-4 века нашей эры.

Затем последовало похолодание раннего средневековья, которое совпало с великим переселением народов, после начался короткий период, длившийся примерно с девятого по тринадцатый век, который характеризовался некоторым потеплением, причем местами до римского климатического оптимума, тем самым получил название средневекового климатического оптимума.

4.2. Антарктида

Для реконструкции температуры в качестве образцов были взяты исследования на станциях: Остров Джеймса Росса, Лоу-дом, Станция Плато.

Временной график изотопной температуры на станции Остров Джеймса Росса приведен на рис.4.2.1.

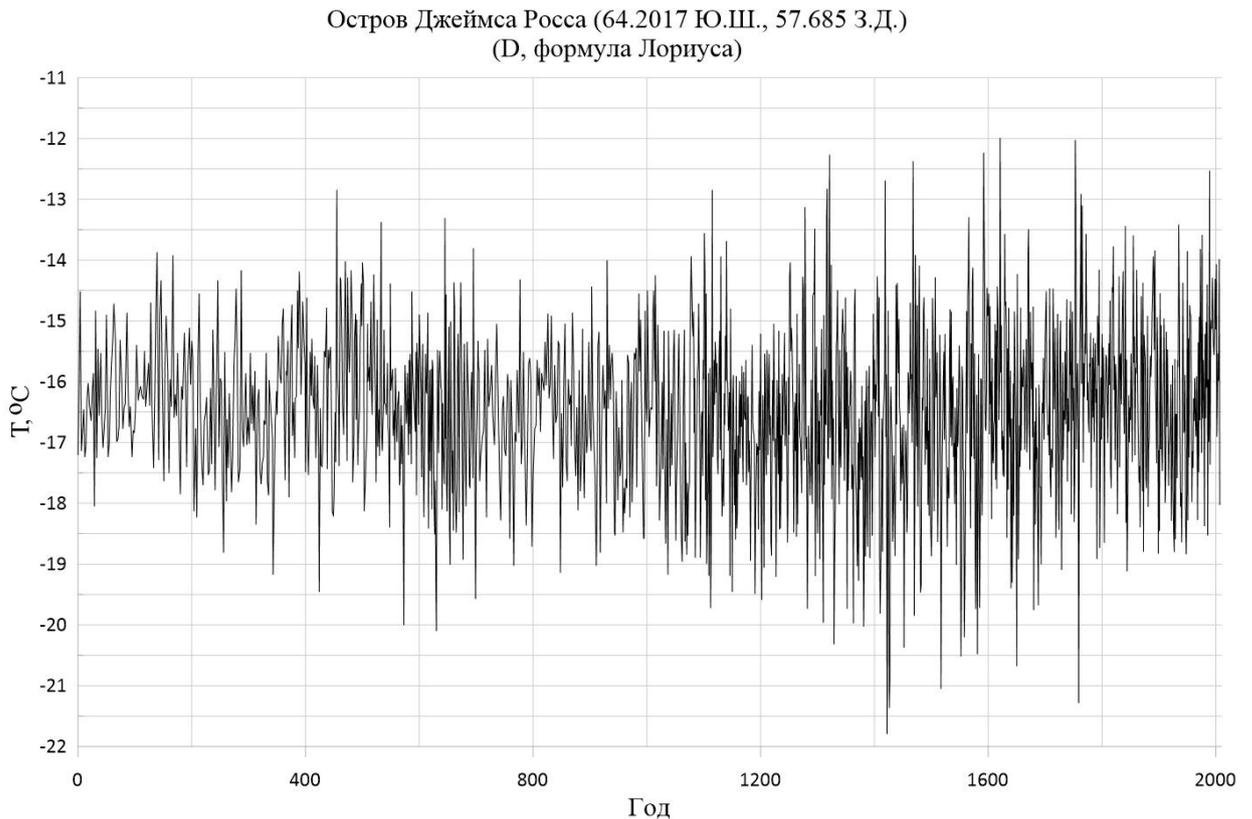


Рис. 4.2.1 Реконструированный временной ряд изотопной температуры на станции Остров Джеймса Росса

Рис. 4.2.1 представляет ход температурной кривой на острове Джеймса Росса за последние 2000 лет. За основу реконструкции был взят δD и использованы следующие формулы: глобальная формула в рамках проекта МАГАТЭ. Промежуток реконструкции лежит между 2007 и 0 годом нашей эры.

Значения температурного хода кривой усреднялись за 10 лет для того, чтобы возможно было проследить закономерности. Под закономерностями понимаем существенные климатические изменения, зафиксированные в исторических хрониках такие как: римское потепление, похолодание раннего средневековья, средневековый климатический оптимум, малый ледниковый период. Результат представлен на Рис. 4.2.2.

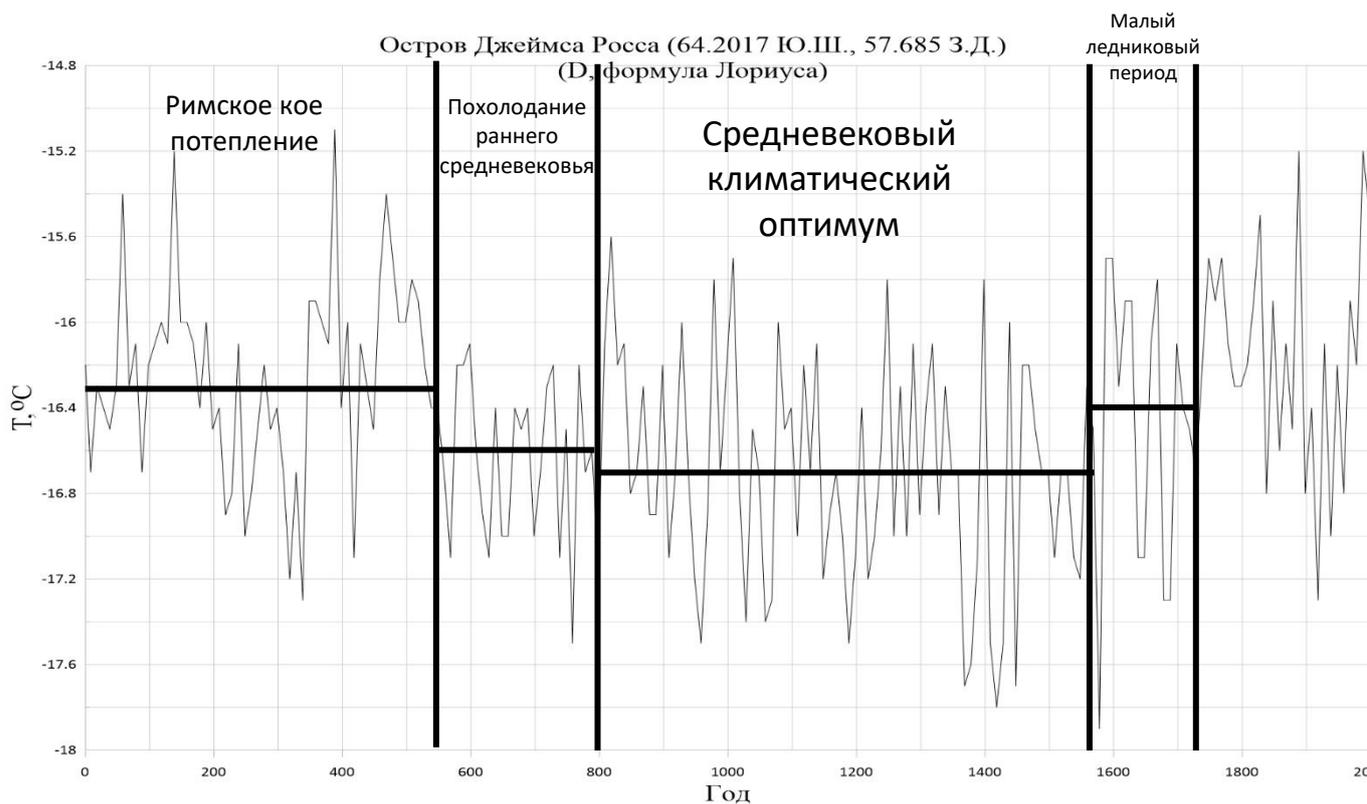


Рис. 4.2.2. Выделение основных климатических потеплений и похолоданий на временном графике изотопной температуры по станции Остров Джеймса Росса

На рисунке 4.2.2 отмечены периоды, совпадающие с историческими изменениями климата, зафиксированных в европейских исторических хрониках. Как видно из рис.4.2.2, римское потепление, похолодание раннего средневековья, средневековый климатический оптимум, малый ледниковый период нашли отражения в колебаниях температурной кривой, восстановленной в точке «Остров Джеймса Росса».

Римское потепление продолжалось здесь до 540 г н.э, сопровождаясь понижением температуры ближе к завершению и средняя температура за данный период составила -16.3 °С. Статистические показатели данного периода следующие:

Количество членов в выборке = 55

Критерий Фишера = 1.376 Крит= 1.67 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.365 Крит= 2.01– Стационарен $\alpha=0.05$

Похолодание раннего средневековья, следовавшее за римским потеплением продолжилось до 810 г н.э , сопровождаясь понижением средней температуры до -16.6 °С. Статистические показатели данного периода следующие:

Количество членов в выборке = 28

Критерий Фишера = 1.972 Крит= 2.53 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.254 Крит= 2.05– Стационарен $\alpha=0.05$

Период малого климатического оптимума сопровождается понижением температуры до -16.7 °С и он становится более стационарным и продолжительным , чем предыдущие. Продолжался период с 810 по 1580 год н.э. Статистические показатели данного периода следующие:

Количество членов в выборке = 78

Критерий Фишера = 1.331 Крит= 1.51 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.816 Крит= 1.98– Стационарен $\alpha=0.05$

Малый ледниковый период в данной реконструкции начинается в 1580 году и отличается потеплением, в нем средняя температура возрастает до -16.4 °С, что является отличием от временных рамок этих периодов в Европе, заканчивается период в 1720 году. Статистические показатели данного периода следующие:

Количество членов в выборке = 15

Критерий Фишера = 1.022 Крит= 3.73 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.380 Крит= 2.13– Стационарен $\alpha=0.05$

Однако начало и конец климатических периодов несколько отличаются, а также отличается процесс, происходящий в самих периодах. Так ступенчатое изменение температуры малого ледникового периода показывает, что она повышается, а не понижается, составив -16.3 °С. Но то что эти периоды присутствуют является основанием для утверждения глобальности процессов зафиксированных в европейских исторических хрониках.

Временной график изотопной температуры на станции Лоу Доум приведен на рис.4.2.3.

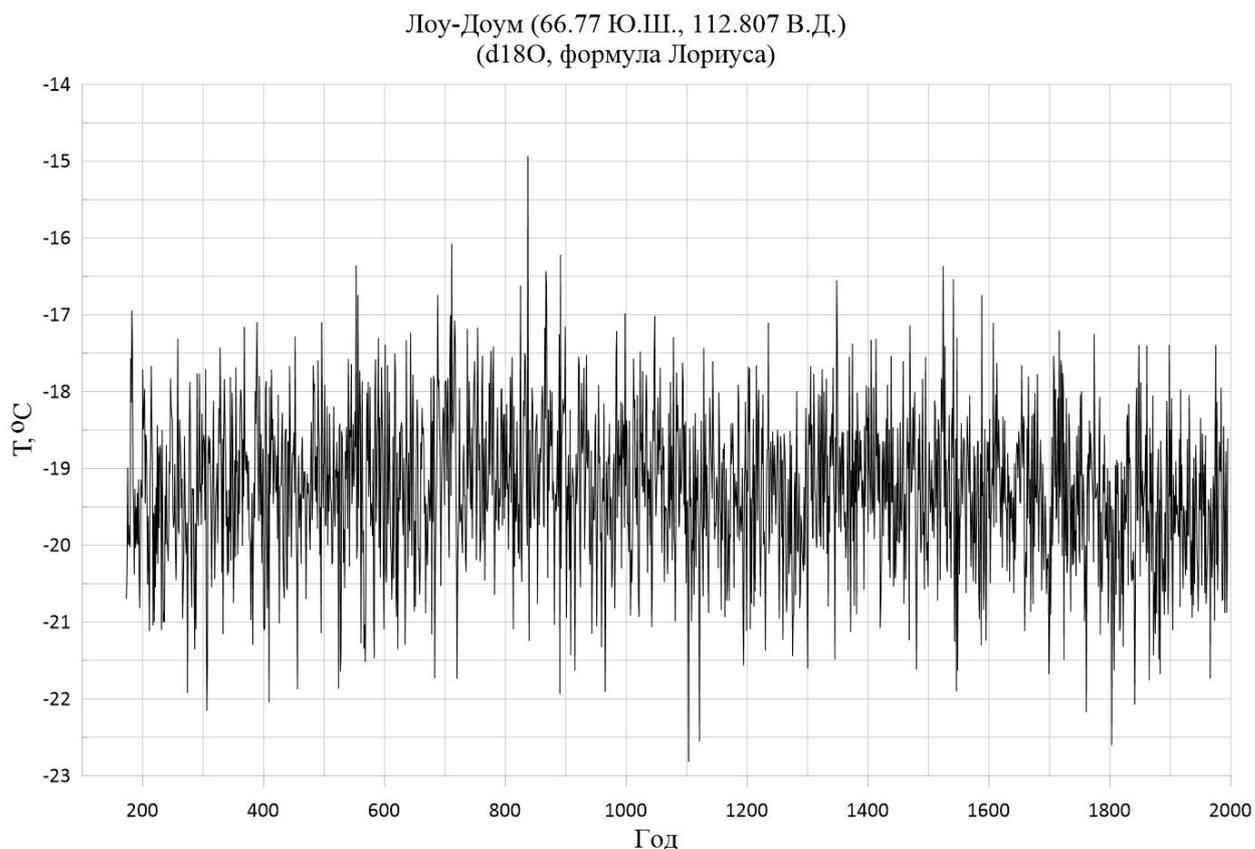


Рисунок 4.2.3. Реконструированный временной ряд изотопной температуры на станции Лоу Доум

Исследование на базе Антарктической станции Лоу-Доум основывалось на δO^{18} и для реконструкции использовались две формулы: глобальная в рамках проекта МАГАТЭ и формулы Лориуса. Промежуток реконструкции лежит между 1995 и 173 годом нашей эры. Дискретность составляет 1 год.

Для демонстрации закономерностей в ходе температурной кривой, а именно выделение периодов существенных климатических изменений, нашедших отражение в исторических хрониках Европы, таких как римское потепление, похолодание раннего средневековья, средневековый климатический оптимум, малый ледниковый период, значения температуры представляются осреднениями за 10 лет, и представлены на рис. 4.2.4.



Рисунок 4.2.4. Выделение основных климатических потеплений и похолоданий на временном графике изотопной температуры

по станции Лоу-Доум

Рисунок 4.2.4 показывает, что на базе станции Лоу-Дом реконструкция представлена 4 периодами : Римское потепление, похолодание раннего средневековья, средневековый климатический оптимум, малый ледниковый период.

Римское потепление не зафиксировано с самого начала, так как керн начинается с 206 года н.э. , однако оно прослеживается до 1086 года, средняя температура этого периода составляет $-19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Количество членов в выборке = 89

Критерий Фишера = 1.042 Крит= 1.48 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 2.371 Крит= 1.98 – Не стационарен $\alpha=0.05$

Похолодание раннего средневековья непродолжительно и смещено от его исторического начала на 200 лет, оно продолжается с 1086 по 1296 год н.э. и сопровождается падением средней температуры в данном промежутке, которая составляет $-19.4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Количество членов в выборке = 22

Критерий Фишера = 1.022 Крит= 2.79 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.064 Крит= 2.07 – Стационарен $\alpha=0.05$

Период совпадающий со средневековым климатическим оптимумом начинается с 1296 г н.э. и заканчивается в 1716 г н.э. средняя температура повысилась до $-19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Период смещен на 400 лет относительно исторических событий.

Количество членов в выборке = 43

Критерий Фишера = 1.489 Крит= 2.05 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.514 Крит= 2.02 – Стационарен $\alpha=0.05$

Малый ледниковый период начался с 1716 г н.э. и продолжается по сей день, средняя температура опустилась до уровня -19.6 °С. Данный период также смещен примерно на 400 лет относительно событий, зафиксированных в исторических хрониках.

Количество членов в выборке = 28

Критерий Фишера = 7.237 Крит= 2.53 – Не стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.846 Крит= 2.05 – Стационарен $\alpha=0.05$

Длительность исторических периодов изменения климата, зафиксированных документально за последние 2000 лет в данной точке длиннее и смещены по времени.

Временной график изотопной температуры на станции Плато приведен на рис.4.2.5.

Станция Плато (84 Ю.Ш., 43 В.Д.)
($\delta^{18}\text{O}$, формула Лориуса)

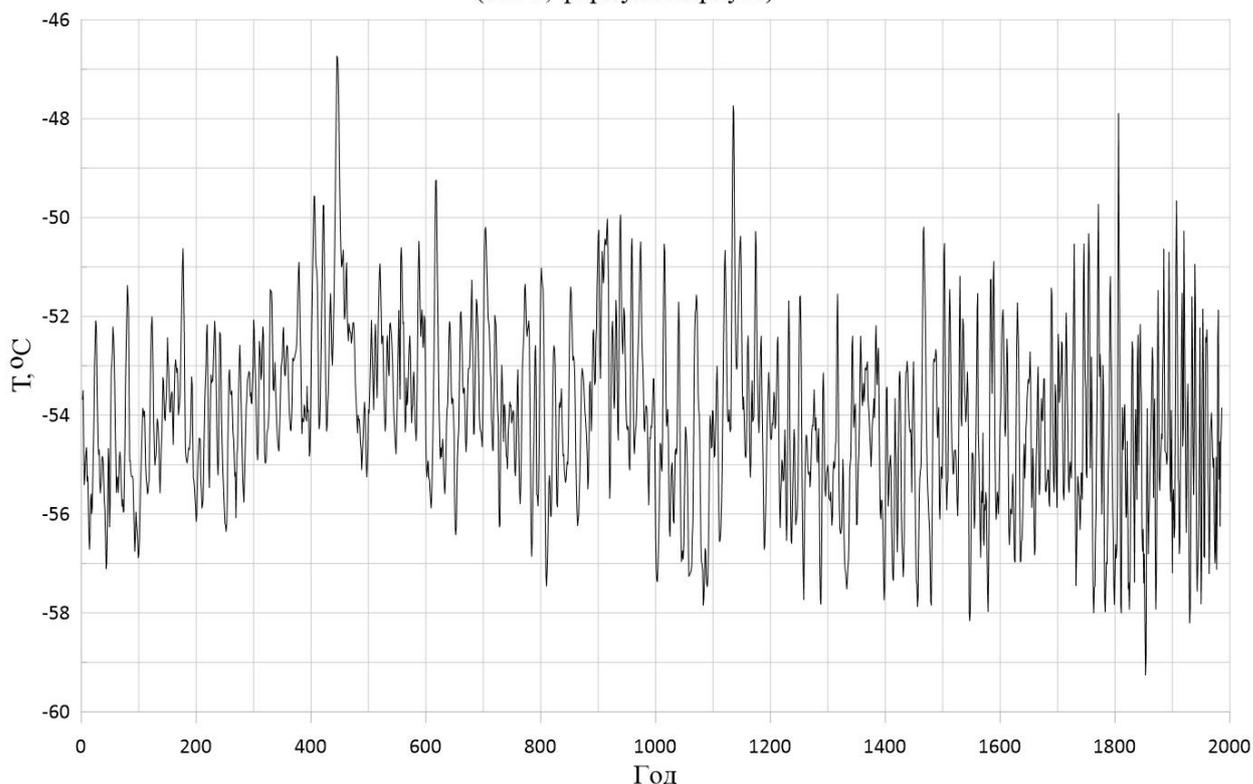


Рис 4.2.5. Реконструированный временной ряд изотопной температуры на станции Плато

На рисунке 4.2.5. изображен ход температурной кривой за последние 2000 лет. Промежуток составил с 1995 года по 0 г нашей эры. За основу реконструкции был взят δO^{18} и использованы две формулы: глобальная в рамках проекта МАГАТЭ и формула Лориуса. Дискретность составляет 1 год. Для более удобного рассмотрения закономерностей усредним показатели температурной кривой за 10 лет, результаты представим на рисунке 4.2.6. Закономерностями представляются периоды резкого изменения климата, зафиксированного в хрониках, о которых говорилось выше.

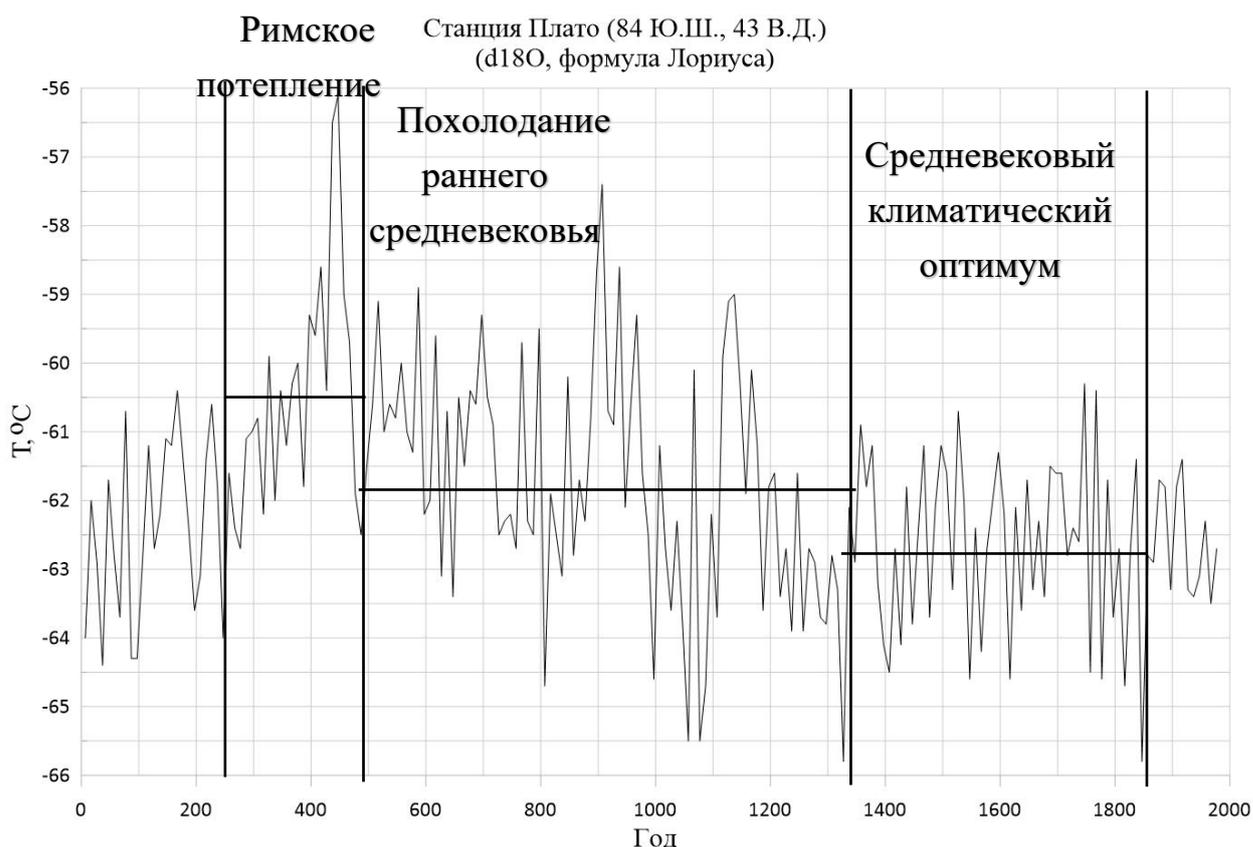


Рисунок 4.2.6. Выделение основных климатических потеплений и похолоданий на временном графике изотопной температуры по станции Плато

Реконструкция температуры на основе исследования на станции Плато показывает, что наблюдаются только три периода: римское потепление, похолодание раннего средневековья и средневековый климатический оптимум.

Римское потепление. Данный период в реконструкции на станции Плато продолжался с 257 до 497 года н.э. Во время периода температура постоянно возрастала и в своем среднем среднегодовом значении, осредненном за 10 лет составила $-60.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Количество членов в выборке = 25

Критерий Фишера = 1.396 Крит = 2.600 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 1.110 Крит= 2.059 – Стационарен $\alpha=0.05$

Похолодание раннего средневековья представляет собой длительный период с 497 по 1327 год н.э. средняя температура на данном участке составила -61.7 °С, то есть произошло понижение температуры. Похолодание раннего средневековья в сравнении с тем, что происходило в Европе согласно историческим хроникам происходит гораздо дольше и сопровождается кратковременными повышениями температуры, но система продолжает стремиться к понижению температуры.

Количество членов в выборке = 84

Критерий Фишера = 1.555 Крит= 1.510 – Не стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 2.932 Крит=1.983 – Не стационарен $\alpha=0.05$

Средневековый климатический оптимум представлен как участок без выделяющихся максимумов и минимумов температуры в связи с чем произошло понижение среднегодовой температуры, осредненной за 10 лет, до уровня в -62.7 °С. В связи с чем средневековый климатический оптимум представляет собой сразу малый ледниковый период. Продолжительность с 1327 по 1847 год н.э.

Количество членов в выборке = 53

Критерий Фишера = 1.193 Крит= 1.95 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.170 Крит= 2.00 – Стационарен $\alpha=0.05$

4.3. Гренландия

Гренландия в данном временном промежутке представлена двумя исследовательскими проектами: Crete и Dye 3. Временной график изотопной температуры на станции Плато приведен на рис.4.3.1.

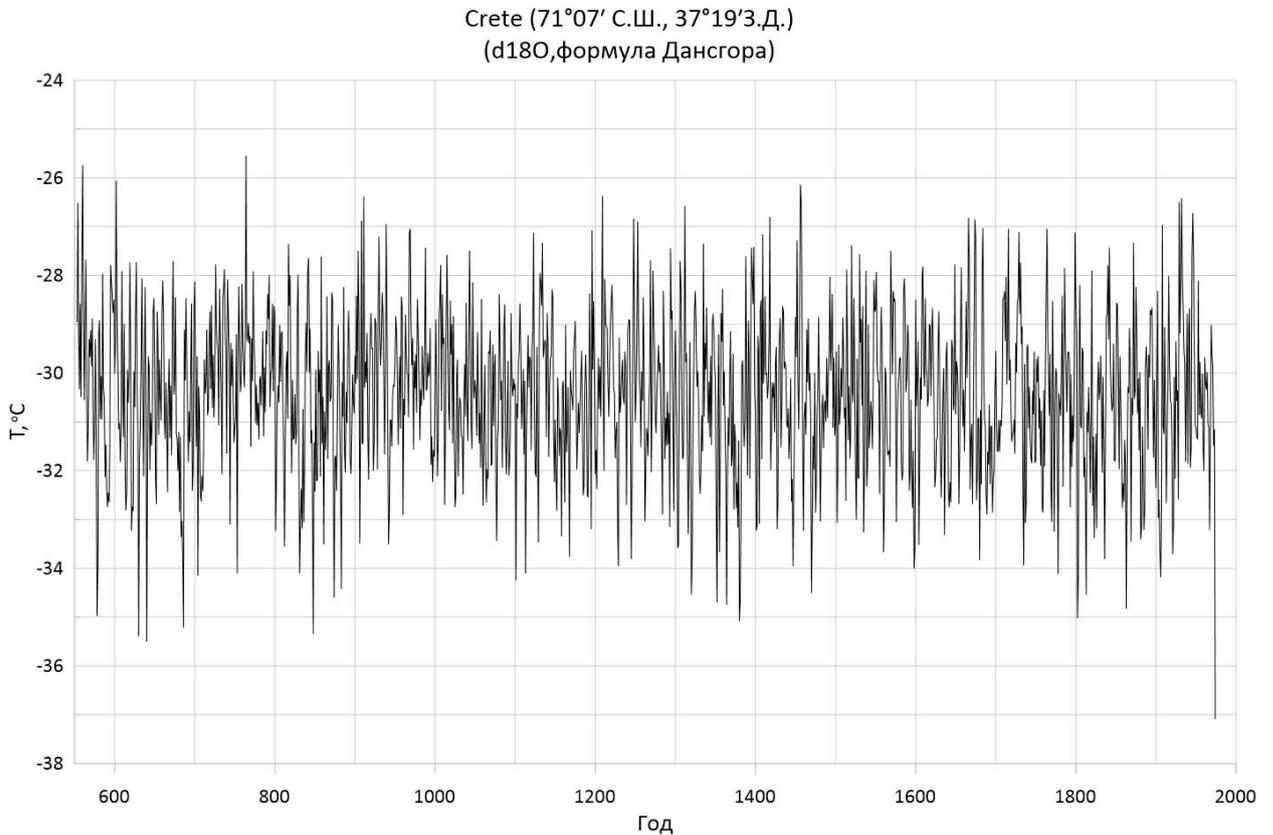


Рисунок 4.3.1. Реконструированный временной ряд изотопной температуры на станции Crete

Исследование на базе станции Crete представляет собой промежуток чуть менее чем 1500 лет и дискретностью 1 год. Основой реконструкции послужил δO^{18} и использованы три формулы: глобальная в рамках проекта МАГАТЭ, формула Дансгора, формула Дансгора-Йонсена. Дискретность составляет 1 год.

Для удобства выделения циклов осреднили данные температурной кривой за 10 лет. Результат на рисунке 4.3.2



Рисунок 4.3.2. Выделение основных климатических потеплений и похолоданий на временном графике изотопной температуры по станции Crete

На данном керне присутствуют лишь два исторических климатических периода: средневековый климатический оптимум и малый ледниковый период.

Средневековый климатический оптимум начинается в 605 году н.э. , а заканчивается в 1375 году н.э., завершается резким падением среднегодовой температуры, осредненной за 10 лет, и представляет собой период с повышением температуры и её постепенным снижением. Средняя

температура на данном участке составляет $-30.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. По картине протекания не соответствует историческим событиям.

Количество членов в выборке = 78

Критерий Фишера = 1.019 Крит=1.510 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 1.233 Крит=1.997 – Стационарен $\alpha=0.05$

Малый ледниковый период продолжается с 1375 г н.э. по 1855 г. н.э. представляет собой постепенное снижение температуры с непродолжительными очагами роста. Среднегодовая температура за данный период составила $-30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. На данной реконструкции не получается рассмотреть предыдущие периоды из-за позднего начала участка реконструкции.

Количество членов в выборке = 49

Критерий Фишера = 1.208 Крит=1.960 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 1.043 Крит=2.011 – Стационарен $\alpha=0.05$

В целом ход температурной кривой практически не изменяется и ряд стационарен.

Временной график изотопной температуры на станции Day приведен на рис.4.3.3.

Dye 3 (65°11' С.Ш., 43°49' З.Д.)
(d18O, формула Дансгора)

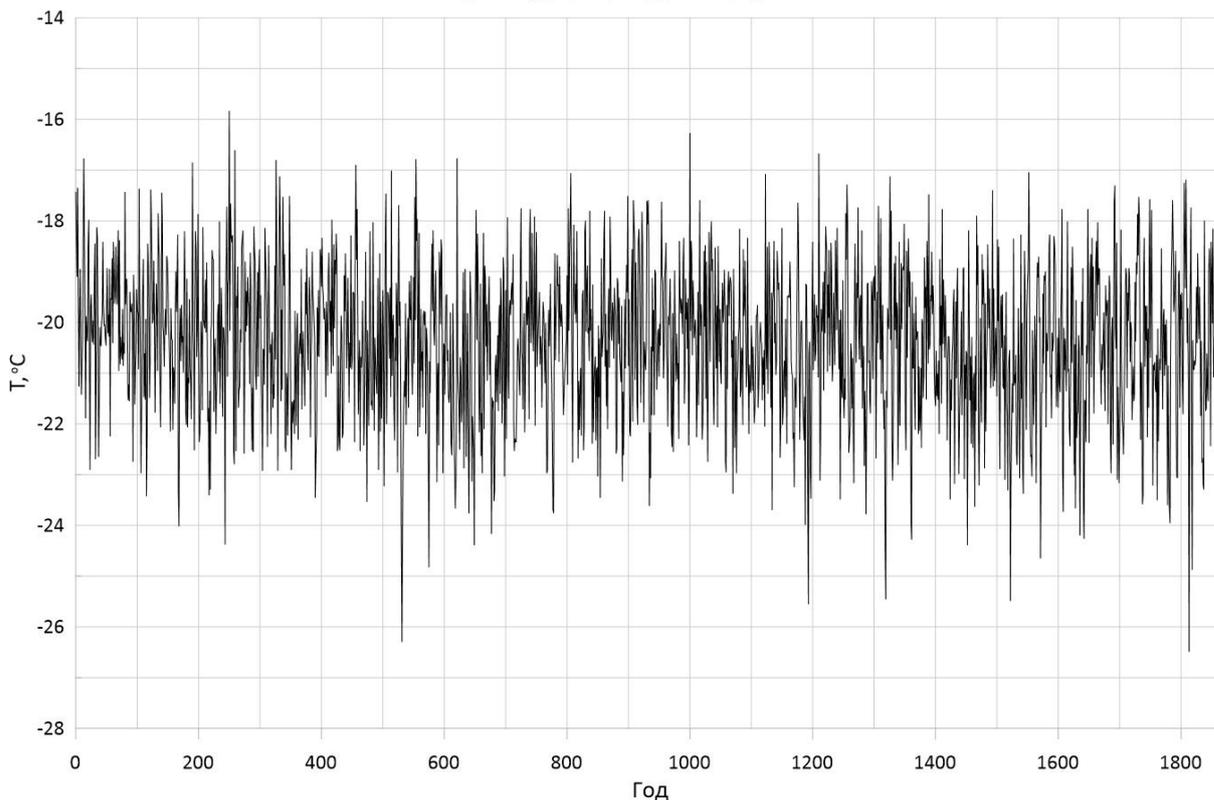


Рисунок 4.3.3. Реконструированный временной ряд изотопной температуры на станции Dye 3

Исследование на базе станции Dye 3 представляет собой промежуток в 1873 лет и дискретностью 1 год. Основой реконструкции послужил δO^{18} и использованы три формулы : глобальная в рамках проекта МАГАТЭ, формула Дансгора, формула Дансгора-Йонсена. Промежуток с 1873 по 0 год нашей эры.

Для удобства выделения циклов усреднили данные температурной кривой за 10 лет. Результат на рисунке 4.3.4

Дуе 3 (65°11' С.Ш., 43°49' З.Д.)
(d18O, формула Дансгора)

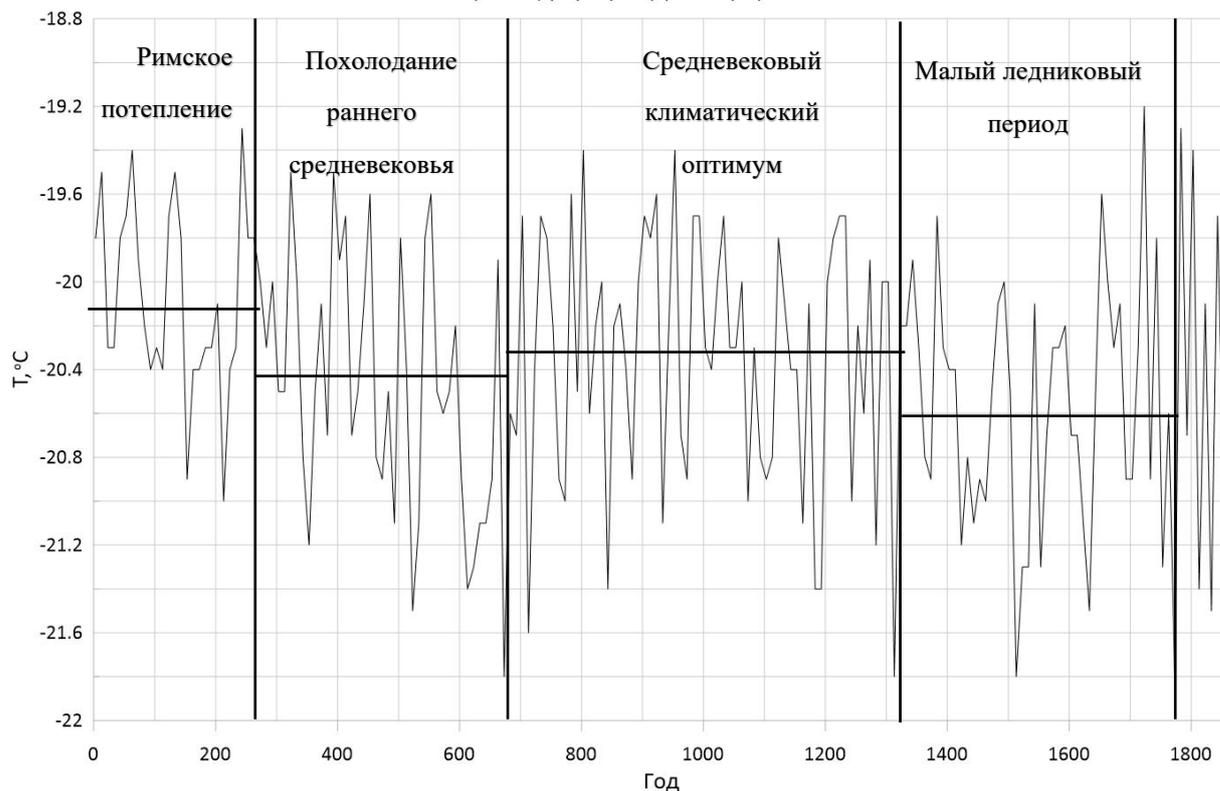


Рисунок 4.3.5 Выделение основных климатических потеплений и похолоданий на временном графике изотопной температуры по станции Дуе 3

Исследование представлено четырьмя историческими периодами: Римское потепление, похолодание раннего средневековья, средневековый климатический оптимум, малый ледниковый период.

Римское потепление продлилось до 243 г н.э., среднегодовая температура, осредненная за 10 лет составила на данном участке значение равное -20.1 °C.

Количество членов в выборке = 25

Критерий Фишера = 1.128 Крит=2.600 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.600 Крит=2.059 – Стационарен $\alpha=0.05$

Похолодание раннего средневековья продолжается с 243 года н.э. и заканчивается в 673 году н.э. среднегодовая температура уменьшается до значения -20.4°C .

Количество членов в выборке = 44

Критерий Фишера = 1.442 Крит=2.130 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 3.499 Крит=2.011 – Не стационарен $\alpha=0.05$

Средневековый климатический оптимум продолжался с 673 года н.э. по 1303 год н.э. Средняя температура повысилась до -20.3°C .

Количество членов в выборке = 64

Критерий Фишера = 1.509 Крит=1.510 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.126 Крит=1.999 – Стационарен $\alpha=0.05$

Малый ледниковый период продолжался с 1303 года н.э. и закончился в 1773 году н.э. В данном периоде температура опустилась до значения -20.6°C .

Количество членов в выборке = 48

Критерий Фишера = 1.102 Крит=1.980 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.494 Крит=2.011 – Стационарен $\alpha=0.05$

Данное расположение и продолжительность климатических периодов, которые были отображены в исторических хрониках, достаточно близко к их историческим проявлениям в Европейской части земного шара.

4.4. Ледники гор

Данные исследования представлены двумя кернами, полученными в Гималаях, на базе Dasuori, а также керном на базе Dunde Ice Cap. Результаты первой реконструкции представлены на рисунке 4.4.1.

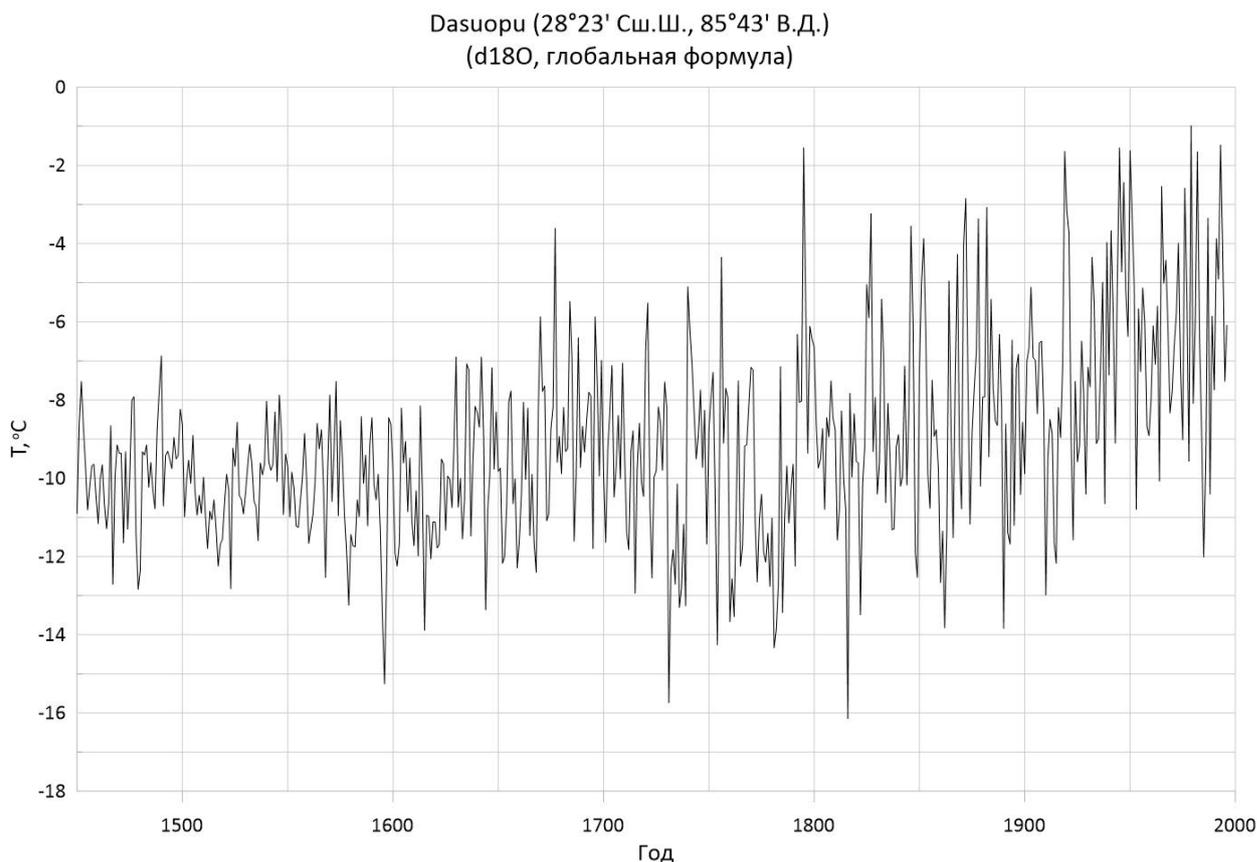


Рисунок 4.4.1. Реконструированный временной ряд изотопной температуры на станции Dasuori

Реконструкция температурного хода кривой проводилась на основе $\delta O18$ и проводилась по глобальной формуле, полученной в рамках проекта МАГАТЭ. Продолжительность керна составляет 546 лет, находящихся в промежутке между 1450-1996 годом нашей эры. Дискретность в данном случае составляет один год, что позволяет подробно проследить изменения среднегодовой температуры.

Для проведения анализа исторических периодов, среднегодовая температура была усреднена за 10 лет, результат представлен на рисунке 4.4.2.



Рисунок 4.2.2 Выделение основных климатических потеплений и похолоданий на временном графике изотопной температуры по станции Dasuoru

В данном случае ход температурной кривой соответствует средневековому климатическому оптимуму, закончившемуся в 1777 году. Средняя температура на участке составила $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Особенностью является то, что отсутствует малый ледниковый период. В связи с чем есть необходимость проследить ход температурной кривой немного глубже, для чего возьмем второй керн, представленный на рисунке 4.2.3.

Количество членов в выборке = 33

Критерий Фишера = 1.992 Крит=2.400 – Значим $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 1.834 Крит=2.042 – Значим $\alpha=0.05$

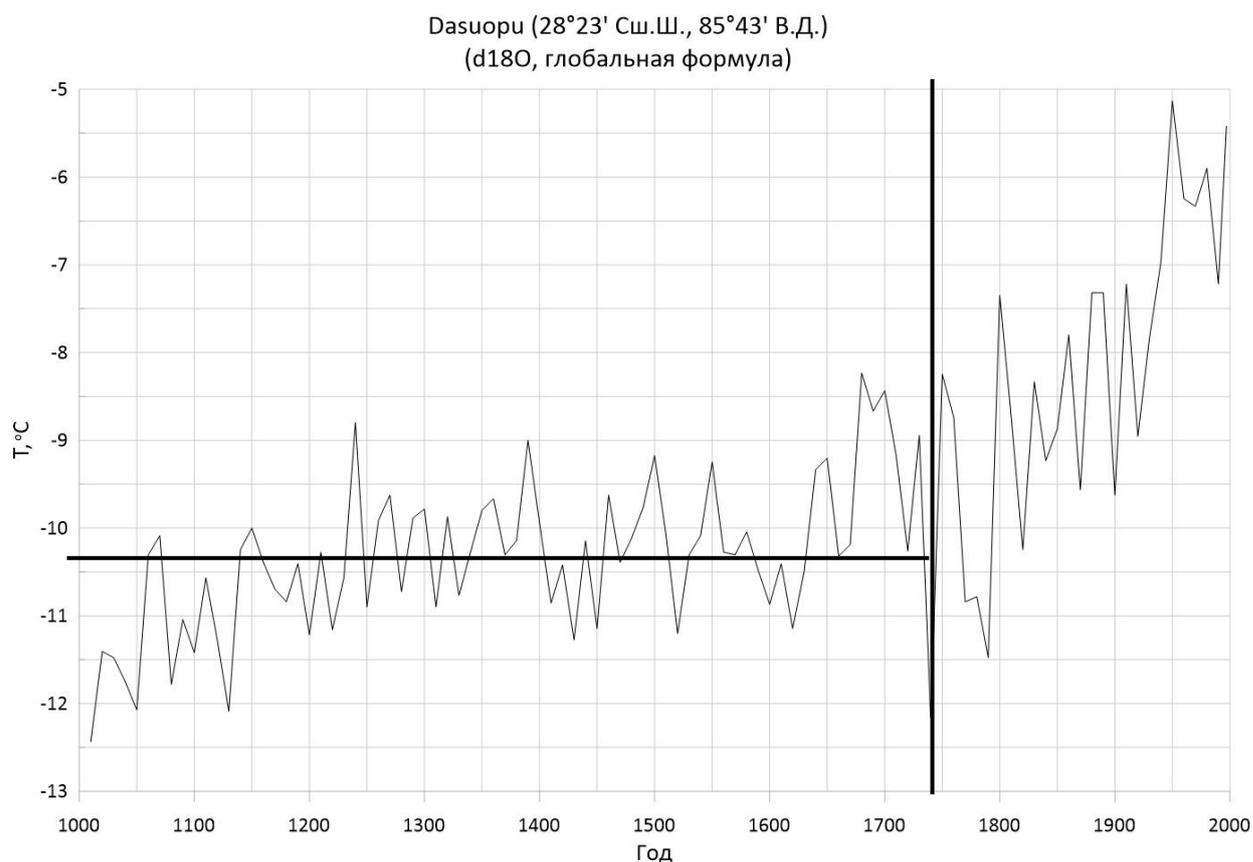


Рисунок 4.2.3 Реконструированный временной ряд изотопной температуры на станции Dundee Ice Cap

Ход температурной кривой в данном керне реконструировался таким же образом как и на рисунке 4.2.2, единственным его отличием является то, что дискретность составляет 10 лет.

Как видно из рисунка 4.2.3 на данном ходе температурной кривой отсутствует малый ледниковый период, а вместо него присутствует средневековый климатический оптимум, который мог наступить после похолодания в раннем средневековье, если судить по общей динамики. Заканчивается в 1740 году н.э., сменяясь более быстрым потеплением. Средняя температура равна -10.4 °C.

Количество членов в выборке = 74

Критерий Фишера = 1.140 Крит=1.510 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 3.206 Крит=1.998 – Не стационарен $\alpha=0.05$

Рассмотрим третий керн на в точке Dundee Ice Cap, который представлен на рисунке 4.2.4.

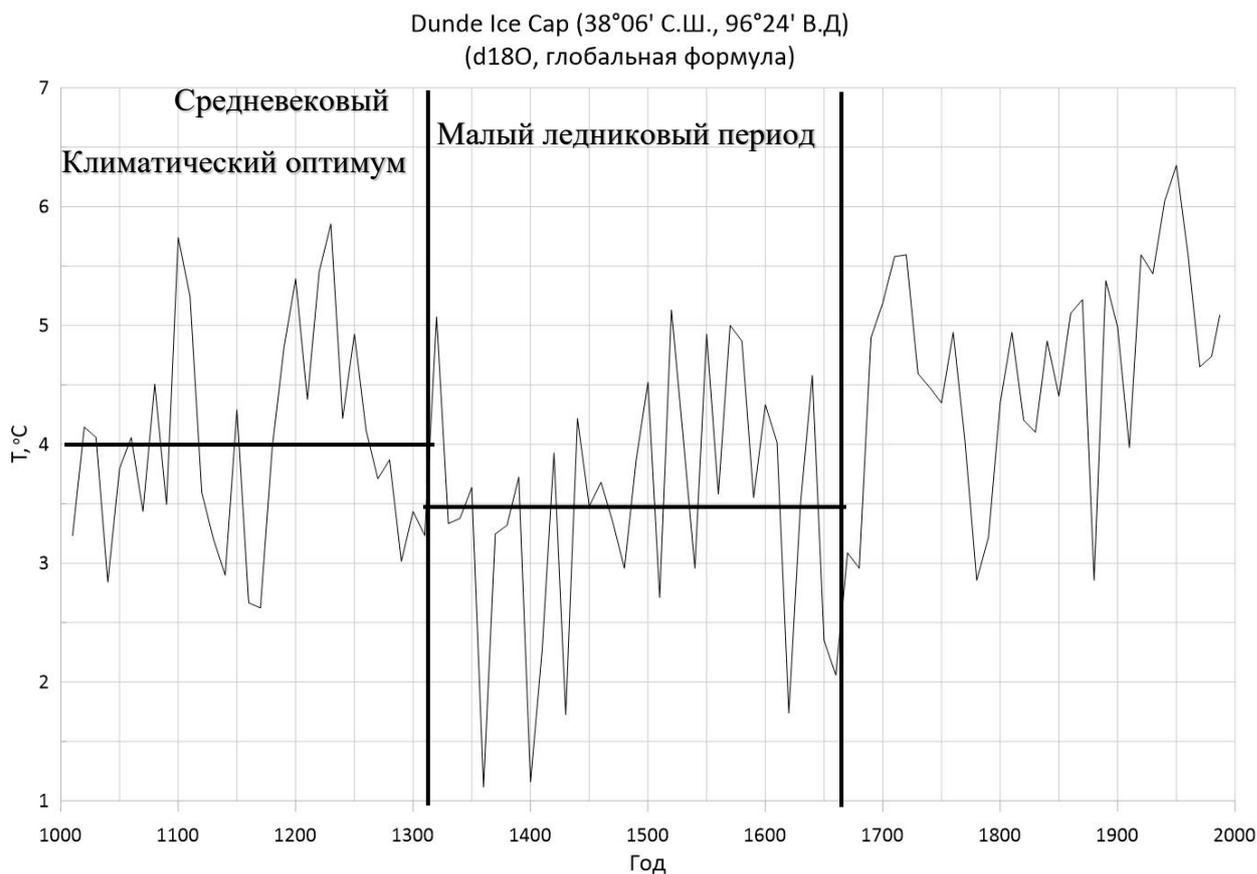


Рисунок 4.2.4. Выделение основных климатических потеплений и похолоданий на временном графике изотопной температуры по станции Dundee Ice Cap

Дискретность данного керна равна 10 годам, а реконструкция проводилась такими же методами, как и в предыдущем керне.

На данном рисунке мы наблюдаем, что участок, который можно охарактеризовать как средневековый климатический оптимум заканчивается в 1310 году н.э., средняя температура составила 4.0 °C

Количество членов в выборке = 31

Критерий Фишера = 1.243 Крит=2.400 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 0.967 Крит=2.042 – Стационарен $\alpha=0.05$

Затем следует участок похолодания в промежутке 1310-1660 года н.э., соответствующий малому ледниковому периоду, средняя температура составила 3.5 °С. Далее начинается потепление вплоть до наших дней.

Количество членов в выборке = 36

Критерий Фишера = 1.071 Крит=2.399 – Стационарен $\alpha=0.05$

Критерий Стьюдента = 1.747 Крит=2.041 – Стационарен $\alpha=0.05$

4.5. Сопоставление результатов

В ходе реконструкции температуры за последние 2 тысячи лет действительно выявлялись общие промежутки с тенденциями, соответствующими климатическим изменениям, зафиксированным в исторических хрониках (Римское потепление, похолодание раннего средневековья, средневековый климатический оптимум, малый ледниковый период).

Однако продолжительность, а также присутствие данных периодов на определённых временных участках зависят от широты места. Так в точках «Остров Джеймса Родса» (Антарктида) и «Дуе 3» (Гренландия) наблюдаются все перечисленные исторические климатические периоды, и попадают во время их фиксации, однако с ростом широты, данные процессы имеют свойство удлиняться. Так происходит с похолоданием раннего средневековья или один период замещает другой (средневековый климатический оптимум подменяется малым ледниковым периодом), примером чему служит Станция Плато в Антарктиде, расположенная на 84 параллели Южного полушария. Керн, полученный на 28 параллели северного полушария в Гималаях так и

вовсе исключает малый ледниковый период, в тоже время керн с 38 параллели Северного полушария уже содержит малый ледниковый период.

Таким образом, изменения происходившие в Европе за последние 2 тысячи лет на самом деле носят глобальный характер, за тем исключением, что в некоторых точках они происходили дольше или смещались во времени на десятки или сотни лет.

Заключение

В ходе исследования были получены реконструкции хода температуры в Антарктиде, Гренландии и горных ледниках за разные периоды времени: от 2 до 800 тыс. лет.

1). Прежде всего на основании найденных в литературных источниках зависимостей между изотопными отношениями и температурой воздуха удалось оценить стандартную погрешность восстановления палеотемпературы изотопным методом, стандартное отклонение которой составляет всего 1.2°C . Также установлены функциональные зависимости между разными формулами расчета температуры и показано, что результаты расчетов по разным формулам отличаются только систематической погрешностью.

2). В кернах, реконструирующих температуру за сотни тысяч лет, наблюдаются циклы продолжительностью около 100 тысяч лет, начало которых сопровождается резким потеплением, которое может быть неоднородным и включать спады и подъемы при общей продолжительности до 10 тыс. лет. Далее имеет место теплый период межледниковья (максимум цикла) также небольшой продолжительности от 10 до 20 тысяч лет. Затем наступает длительный неоднородный период спада, характеризующий ледниковый период с наибольшей продолжительностью за 100 тысячилетний цикл в 70-80 тысяч лет. Интересно отметить, что из всех внешних факторов такие 100тысячилетние циклы могут быть связаны только с колебаниями эксцентриситета орбиты Земли. Однако даже М.Миланкович в своей астрономической теории климата не уделял эксцентриситету большого внимания, т.к. его вклад в колебания приходящей радиации составлял всего 4% по сравнению с вкладами колебаний прецессии (80%) и оси наклона (16%). Поэтому можно сделать вывод, что климатическая система Земли является неравновесной и в ней вполне может преобладать триггерный механизм, когда малое по величине внешнее воздействие приводит к большим изменениям во

внутреннем состоянии системы, в данном случае к преобладающим 100тысячелетним циклам колебаний палеотемпературы. Причем такие 100тысячелетние циклы прослеживаются и в кернах Гренландии и Антарктиды, т.е. являются глобальными.

3). В кернах, воссоздающих ряды палеотемператур продолжительностью в десятки тысяч лет можно детально исследовать окончание последнего 100-тысячелетнего цикла в виде периода позднеледниковья, переход к последнему современному 100-тысячелетнему циклу и период максимума цикла или голоцена, который продолжается по настоящего времени и должен заместиться в ближайшем будущем началом перехода к новому ледниковому периоду. Данные изотопных исследований ледяных кернов в Гренландии и Антарктиде на этом масштабе времени также дают примерно одинаковые результаты. Они состоят в том, что период подъема 100тысячелетнего цикла составляет всего 8-10 тысяч лет и не является однородным. На ветви подъема имеет место временное похолодание, получившее название «молодой дриас». Период максимума цикла или межледниковье, которое соответствует голоцену также имеет большие амплитуды колебаний вначале и затем они затухают формируя устойчивые квазистационарные колебания, в которых также прослеживаются циклы колебаний в сотни и тысячи лет.

4) Керны, продолжительность температуры в которых не превышает 2000 лет, отражают события зафиксированные в исторических хрониках, к ним относятся: римское потепление, похолодание раннего средневековья, средневековый климатический оптимум, малый ледниковый период. В результате исследования этих кернов в разных частях Земли (Гренландия, ледники Средней Азии, Гималаи, Антарктида) получено, что известные для Европы периоды потеплений и похолоданий проявляются в разных точках планеты или со смещением во времени или иногда совсем не проявляются. И чем дальше от европейского континента или чем больше величина ледника,

тем связанность с европейскими периодами колебаний климата в последние 1,5-2 тысячи лет слабее. Так в реконструкции, полученной по данным на станции «Crete» в Гренландии периоды, соответствующие средневековому климатическому оптимуму и малому ледниковому периоду мало отличаются между собой и практически стационарны, что связано с большой инерционностью гренландского материкового льда. Также и в горных ледниках, находящихся ближе к экватору, малый ледниковый период отсутствует как таковой, его заменяет продолжительный средневековый климатический оптимум. Вместе с тем в ледниках Средней Азии европейские периоды потеплений и похолоданий хорошо проявляются, хотя и со смещением во времени и с изменением их продолжительности. Таким образом, колебания температуры на интервалах продолжительностью 1-2 тысячи, следует рассматривать только в рамках региональной палеоклиматологии.

Список литературы

1. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е., Практикум по климатологии Часть 1, 2011г. – 144с
2. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е., Практикум по климатологии Часть 2, 2012г.- с. 178, Санкт-Петербург.
3. Лобанов В.А., Лекции по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. Кн. 1. В 2 кн.: учебник. – СПб.: РГГМУ, 2016. – 332 с..
4. Лобанов В.А., Лекции по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. Кн. 2. В 2 кн.: учебник. – СПб.: РГГМУ, 2018. – 377 с
5. Абрамова Т.А., Битвинская Т.Т., Борисенков Е.П. и др., Колебания климата за последнее тысячелетие. Ленинград, Гидрометиздат, 1988. - 407 с
6. Монин А.С., Шишков Ю.А., История климата. Гидрометиздат 1979.
7. Битвинская Т.Т., Дендроклиматические Исследования. Гидрометиздат 1974.
8. Климаты западной Европы. Ленинград, Гидрометиздат 1983.
9. Синицын В.М. Введение в палеоклиматологию.- 2-е изд., перераб. и доп.- Л.: Недра, 1980.- 248 с.
10. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data>
11. Хромов С.П., Петросянц М.П. Метеорология и климатология. –М.: Изд-во МГУ, 2001, –528с.
12. Васильчук Ю.К., Котляков В.М., Основы изотопной геокриологии и гляциологии. Из-во Московского университета 2000 год.
13. Lorius C., Merlivat L., Distribution of mean surface stable-isotope values in East Antarctica. Observed changes with depth in a coastal area 1977.
14. Dansgaard W., Stable isotopes in precipitation 1964

15. Dansgaard W., Johnson S.J., Moller J., Langway Jr., One Thousand Centuries of Climatic Record from Camp Century on the Greenland Ice Sheet 1969