

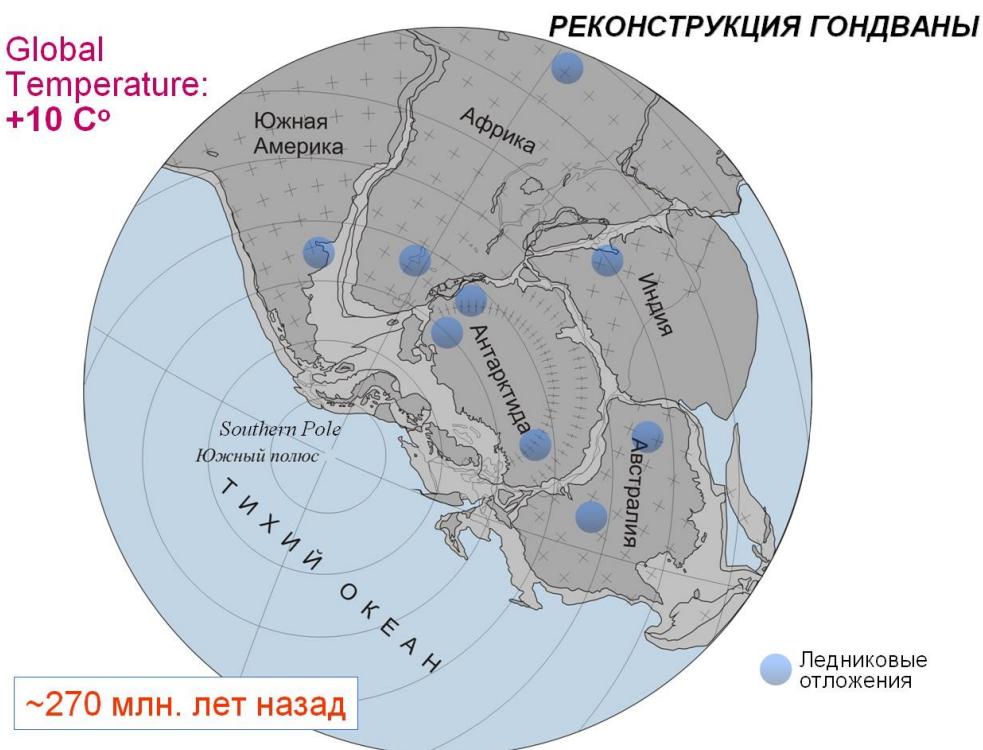
Что делает математика в Антарктиде?

профессор кафедры прикладной математики Саламатин Андрей Николаевич

Я не буду объяснять, что такое математика, но хочу рассказать о том, как ее можно и нужно использовать в жизни, какие интересные сведения об окружающем нас мире мы получаем благодаря этой науке. И, как Вы догадываетесь, наше внимание сосредоточено сейчас на Антарктиде.

"Недавнее" прошлое и настоящее

Всего 270 млн лет тому назад материки были объединены в единое целое – в Гондвану, находились Южном полушарии, в районе Южного полюса. На планете было холодно, поэтому даже в районах, где сейчас не бывает зимы, находят следы прошлых оледенений.



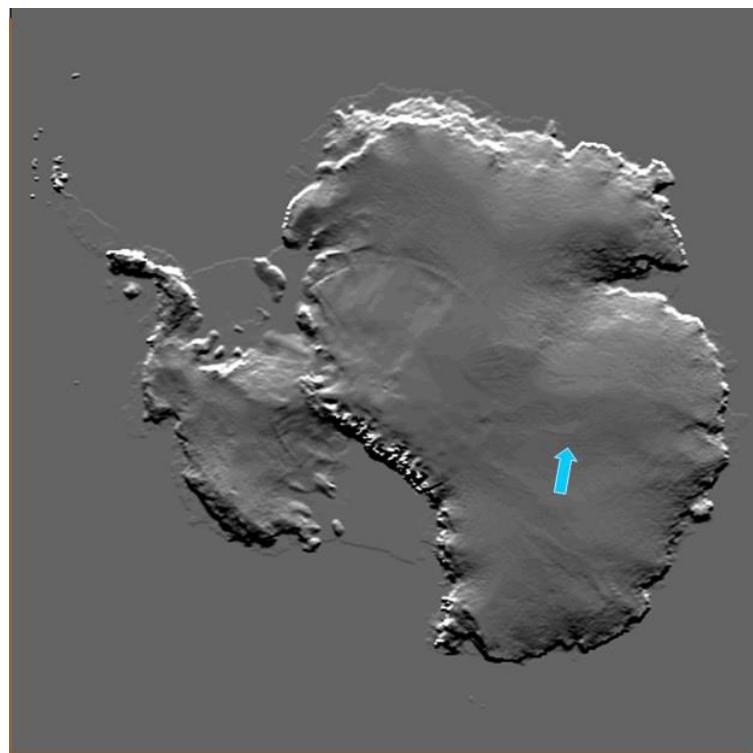
Источник: Лейченков Г.Л.

Затем, 100 млн лет назад, началось глобальное потепление, сформировался климат, который был гораздо жарче, чем сейчас, материки стали "расползаться". В тех местах, где сегодня льды, много тысячелетий назад цвели цветы, и было довольно комфортно.



Источник: Саламатин А.Н.

В наши дни, подплывая к Антарктиде, уже в районе островов Ю. Георгия и Кергелен мы ощущаем дыхание холода и видим что-то похожее на тундру: семейка бакланов мирно пасётся на краю отвесного обрыва над бухтой, заполненной густым "супом" из морских водорослей, далее нас встречают необычные пингвины и морские львы.

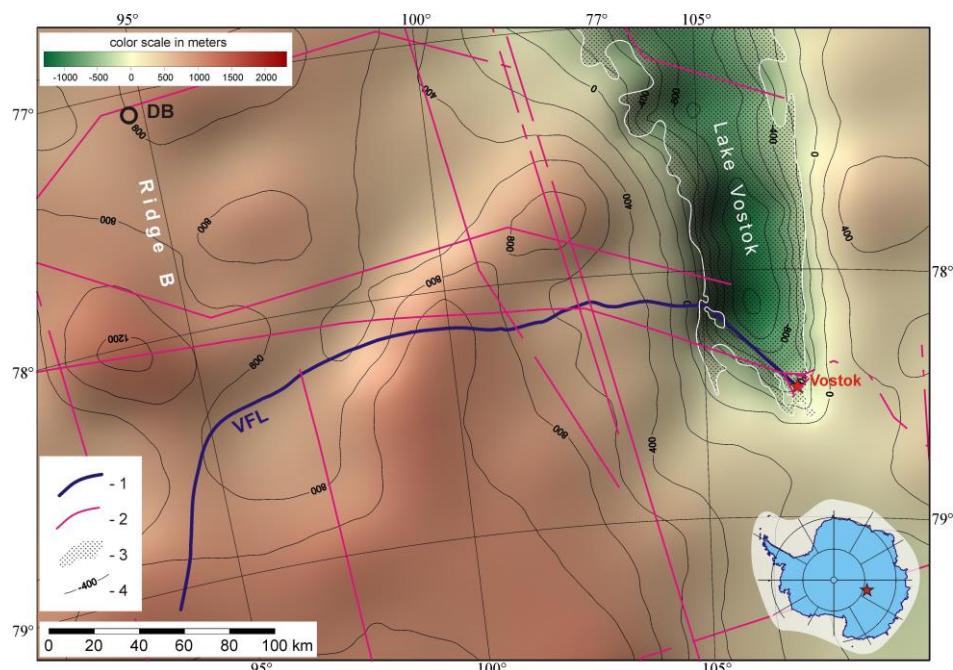


Источник: "LORES"

Из космоса Антарктида – это огромная, покрытая сплошной многокилометровой толщёй льда, страна, 3-4 тыс. км в поперечнике. Современные радиолокационные исследования показывают, что коренной рельеф континента неоднороден: есть и высокие, до 4000 м, горы, и глубокие, до (1000 м, впадины. Тяжелые льды придавили материк, прогнув под ним земную кору на сотни метров. Под ровной снежной поверхностью в центральных районах толщина льда сильно варьирует в зависимости от высоты ложа. Если растопить этот ледяной панцирь, то со временем Антарктида будет "быстро" подниматься над уровнем моря, как Скандинавия.

Открытие подледного озера Восток

Приглядимся повнимательнее к теневому космическому снимку Антарктиды. Справа на восточном побережье находится российская научно-исследовательская обсерватория «Мирный». От нее вглубь континента в направлении Южного полюса, пролегает 1000-километровый маршрут ежегодного санно-гусенечного транспортного похода к самой холодной станции России – станции "Восток". А теперь, главное! – стрелка указывает на небольшое продолговатое светлое пятно прямо в конце этого пути. Его обнаружили только в 90-х гг., когда над центральной Антарктидой прошли первые орбиты научных спутников и появились высококачественные космические фотографии, как та, на которую Вы смотрите. Повышенная яркость в данном районе обусловлена его практически идеально плоской, горизонтальной поверхностью, которая, как на любом водоеме, представляет собой участок льда, покрывающий огромное подледниковое озеро. Его длина около 280 км, а средняя ширина – 80 км; глубина бассейна по предварительным оценкам изменяется с севера на юг от 50 до 800 м.



Источник: Попов С.В., Siegert M.J.

В 50-х годах еще никто не догадывался о существовании такого феномена, и по чистой случайности советская антарктическая станция «Восток» была размещена на южной оконечности озера, которое теперь носит то же имя.

С небес на ледник

Давайте же мысленно перенесемся на побережье Антарктиды в район обс. «Мирный» и познакомимся с этим чудесным миром поближе. Середина января – здесь разгар лета, самое теплое время года. С вертолета можно наблюдать остроконечные перевернувшиеся айсберги, центр тяжести которых из-за таяния подводной части со временем переместился вверх. Подлетаем ближе, видны современные, благоустроенные здания станции, в них живут и работают полярники. Это дома на сваях; они расположены в местах выхода

горных пород. Если этого не делать, постройки заметает снегом и сносит течением льда к обрыву, в океан, как то старое здание у самого края (барьера) ледника.



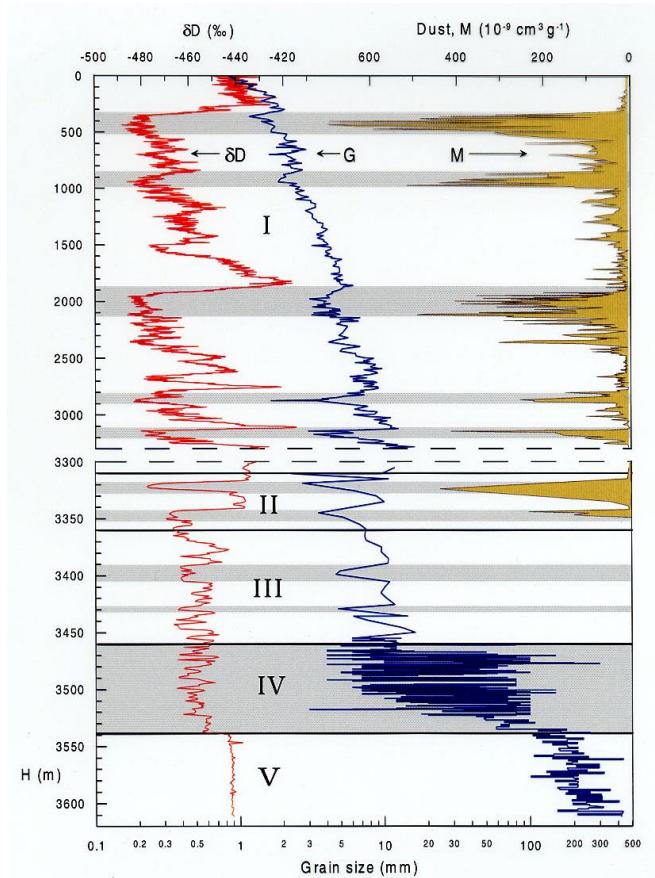
Источник: Саламатин А.Н.

От обс. «Мирный» мы отправляемся на гусеничных тягачах-вездеходах вверх по крутому склону ледникового покрова, вглубь континента и за день, с трудом преодолев 80 км пути, поднимаемся до 1000 м над уровнем моря. Так начинается очередной сезон изучения Антарктиды. Это радиолокационная маршрутная съемка – измерение толщины льда, оценка годовой аккумуляции осадков по сезонным слоям снега в вырытых шурфах, бурение и геофизические измерения в скважинах вдоль трассы до ст. «Восток», где уже пробурена глубокая скважина, впервые достигшая поверхности воды в 2012 году на глубине около 3770 м и уже дважды вскрывавшая озеро. Далее, изучение рельефа ложа, скоростей движения поверхности, характера течения и особенностей структуры ледникового покрова в районе озера «Восток» вдоль показанной на карте синей линии тока льда VFL.

В программе научных исследований бурение и анализ керна (образцов льда) традиционно занимают особое место как главный источник уникальной геофизической информации о прошлом и настоящем ледникового щита Антарктиды и климате нашей планеты в целом. Тяжелое энергоемкое буровое оборудование здесь неприменимо. На предельно больших глубинах используются подвесные буровые снаряды с вращающимися торцевыми резцами. Но до умеренных глубин 2000-2500 м эффективно работают термобуры на кабеле с кольцевым нагревающим элементом – коронкой, которая проплавляет лед, вырезая цилиндрическую колонку ледяного керна. Здесь ничего не вертится, нужно только отсасывать талую воду, чтобы бур не примерз. Можете попробовать сами: включите утюг и поставьте его на лед. Главная конструкторская, математическая задача, которую мы решали, – это найти оптимальную форму коронки, чтобы тепло не терялось на боковой поверхности в ледяном массиве и не расходовалось на лишний перегрев воды на торце.

Лед и вода – не H_2O

Какой же архив данных хранит в себе ледниковый лед? Очень интересная палеоклиматическая летопись природы в разрезе ледяной толщи на ст. «Восток» была составлена в Арктическом и Антарктическом НИИ известным ученым гляциологом-полярником В.Я. Липенковым.



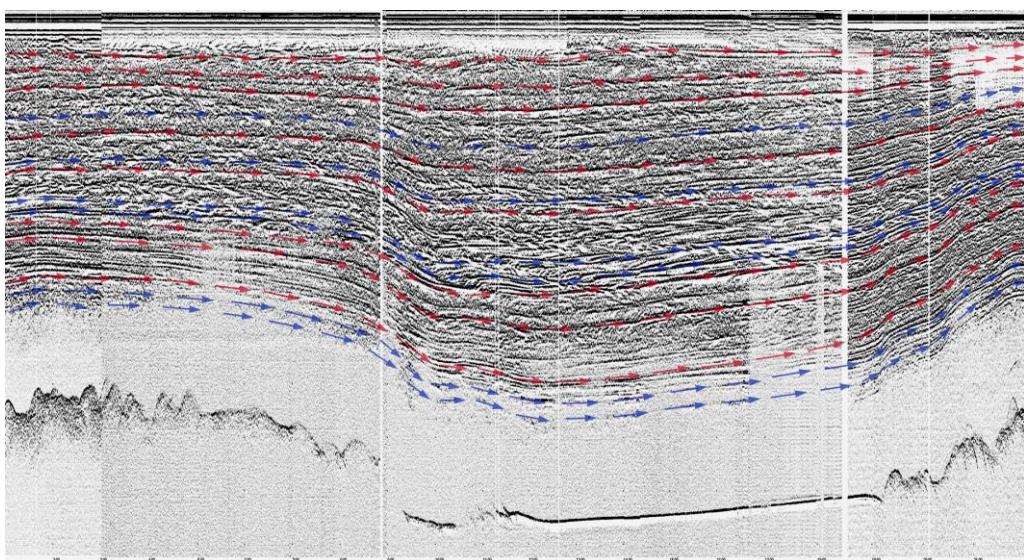
Источник: Липенков В.Я.

Нас учили, и мы привыкли думать, что вода и лед определяются химически как H_2O , но это не совсем верно. На самом деле существуют тяжелые изотопы водорода, дейтерий D_2 , и кислорода O_2^{18} . Они формируют изотопную составляющую "тяжелых" молекул (D_2O и H_2O^{18}) воды в природе. Эти компоненты не так активны, как их "легкие" сестры, они неохотно испаряются с поверхности океана и первыми покидают облака, выпадая обратно в виде дождя и снега. Поэтому в холодные климатические эпохи содержание тяжелых изотопов водорода и кислорода в атмосфере и осадках в центральной Антарктиде заметно снижается по сравнению с теплыми периодами. Достаточно взглянуть на красный профиль колебаний дейтерия, и сразу становится ясно, что мы живем в теплый период, тогда как лед с глубины 500 м образовался в холодное время последнего оледенения, а климат формирования отложений на глубине 1700-1900 м был похож на современный или был даже жарче. В холодные эпохи резко усиливалась ветровая активность атмосферы, и содержание пыли в осадках согласно желтой диаграмме возрастало в десятки раз. Синий график размеров кристаллов льда указывает на то, что повышенная концентрация примесей влияет на процессы рекристаллизации и характер деформации льда, усиливая его кристаллическую зернистость.

Загадка в том, что без математического моделирования динамики ледника мы не можем сказать, когда происходили указанные климатические события. А нам очень важно знать историю климата, чтобы прогнозировать его дальнейшие изменения и правильно оценивать антропогенные составляющие.

Как движется лед и формируется его структура?

Радиолокационные измерения дают картину деформации и течения ледника в окрестности подледного озера (плоская граница – контакт ледника с озером) вдоль линии тока VFL, проходящей через ст. «Восток». На снимке отчетливо видны отмеченные стрелками изохроны – слои льда одного возраста. Эти данные указывают на то, что лед неоднороден и ледник имеет слоистую структуру. Возраст изохрон неизвестен, но мы видим их конфигурацию и распределение по глубине, что помогает правильно моделировать поле скоростей в теле ледникового покрова и рассчитывать возраст льда.



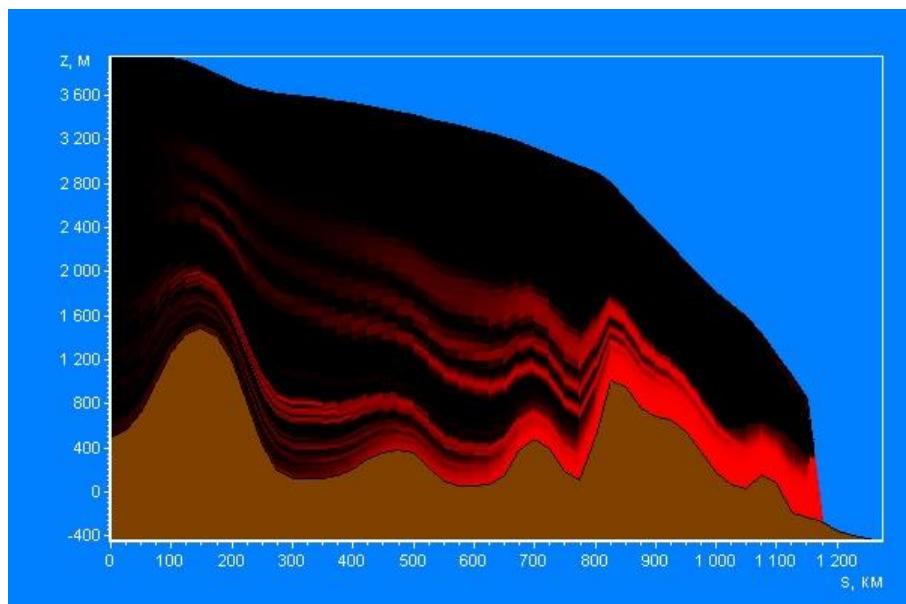
Источник: Попов С.В.

Движение ледника может происходить только в результате сдвига одних слоев льда относительно других. Но как такое возможно в твердом веществе, состоящем из множества кристаллов? Дело в том, что под действием внешней нагрузки и внутренних напряжений кристаллы начинают "перерождаться", одни погибают – другие зарождаются вновь, меняя свою форму и ориентацию. "Мягкие" слои формируются, прежде всего, там, где процесс рекристаллизации идет наиболее интенсивно – там, где больше примесей и пыли. По ним, как "по маслу", как по слоям "крема в торте" и происходит скольжение. Так мы приходим к пониманию основного механизма развития климатически обусловленной структурной неоднородности в ледниковых покровах, определяющей их динамику.

Парадокс нелинейности

В лабораторных экспериментах при больших напряжениях однородный поликристаллический лед ведет себя как нелинейно вязкое вещество: скорость его деформации непропорционально возрастает с ростом приложенных напряжений. Однако при слабых сдвиговых нагрузках, типичных для больших ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии, лед деформируется линейно, с постоянной вязкостью. И все же

наблюдаемая форма поверхности ледникового покрова Антарктиды, представленная на рисунке, этому противоречит.



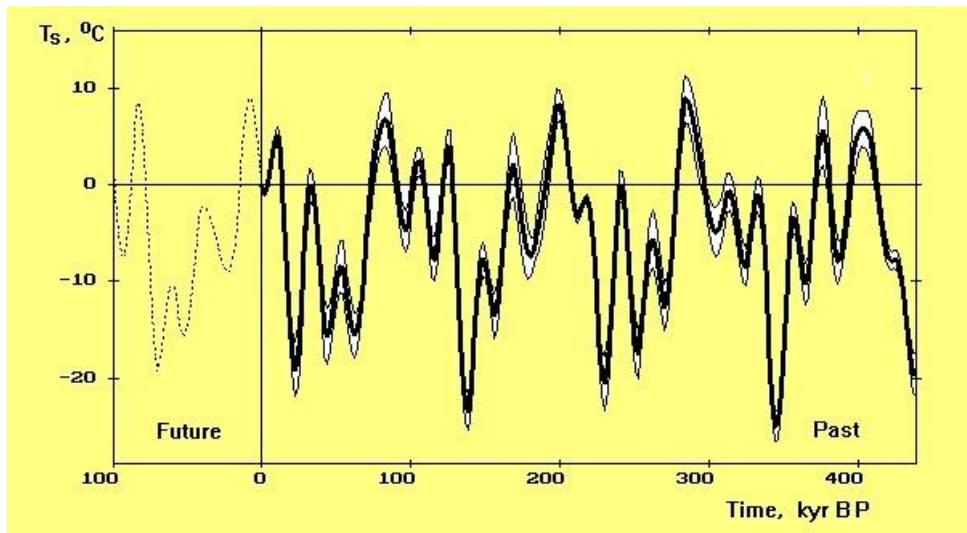
Источник: Маликова Д.Р., Саламатин А.Н.

Математическое моделирование структурной неоднородности ледника позволяет, как рентген, исследовать его внутреннее строение и разрешить данное противоречие. Мы видим, что, чем ближе ко дну, тем больше слоев мягкого (красного) льда. Этот макромасштабный эффект и проявляется как нелинейность в деформации ледника в целом.

Температура и цикличность

Вернемся к пробуренной на ст. «Восток» глубокой скважине. Почему бы нам через несколько лет после бурения не измерить в ней естественное распределение температуры льда по глубине? Ведь нас интересует климат, и по изотопному составу льда мы видим чередование холодных и теплых климатических периодов в прошлом. Если температура в леднике известна с высокой точностью (до сотых долей градуса!), то есть надежда обнаружить в ней следы этих колебаний, проникших в тело ледника с его поверхности. Хочется разгадать очередную загадку природы, понять, когда это было, одновременно ли менялся климат в разных полушариях планеты, какова была реальная амплитуда температурных колебаний?

Вы можете возразить, что это нереальная, как говорят математики, некорректная задача, и совершенно разные изменения климата в прошлом могли оставить похожий след в температурном поле ледника. Но согласно современным представлениям поток солнечной энергии, который получает Земля, а вместе с ним и климат планеты изменяются по определенному закону в соответствии с периодическими колебаниями параметров орбиты Земли, состоящих из 4-х циклов Миланковича. Это значит, что и колебания температуры на поверхности ледникового покрова Антарктиды можно представить как суммы четырех гармоник с неизвестными амплитудами и фазами, и задача реконструкции климата становится вполне разрешимой.

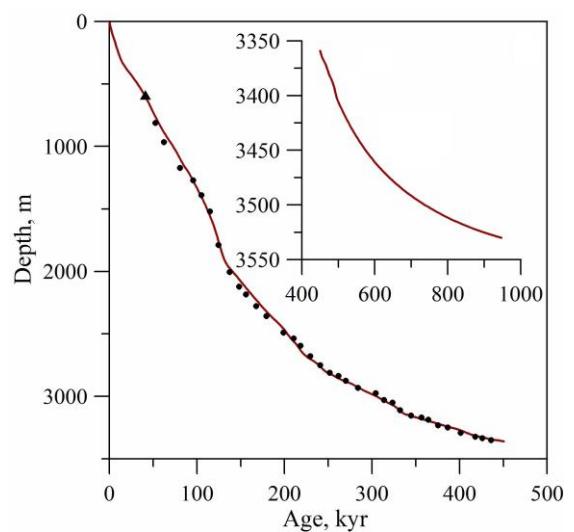


Источник: Саламатин А.Н., Липенков В.Я.

В итоге наш верный помощник – математическая модель процессов теплопереноса в леднике – подсказывает, какими должны быть гармонические составляющие в колебаниях температуры в районе центральной Антарктиды, чтобы рассчитанный современный профиль температуры совпал с измеренным с точностью до одной сотой градуса. Если гипотеза о циклах Миланковича верна, то мы получаем не только реконструкцию климата прошлого, но и предсказываем его изменения в будущем. Временной ход температуры на рисунке (пунктир) говорит о том, что независимо от антропогенного фактора современный климат должен становиться теплее, но примерно через 10 тыс. лет может начаться "резкое" похолодание.

И, наконец, самое главное...

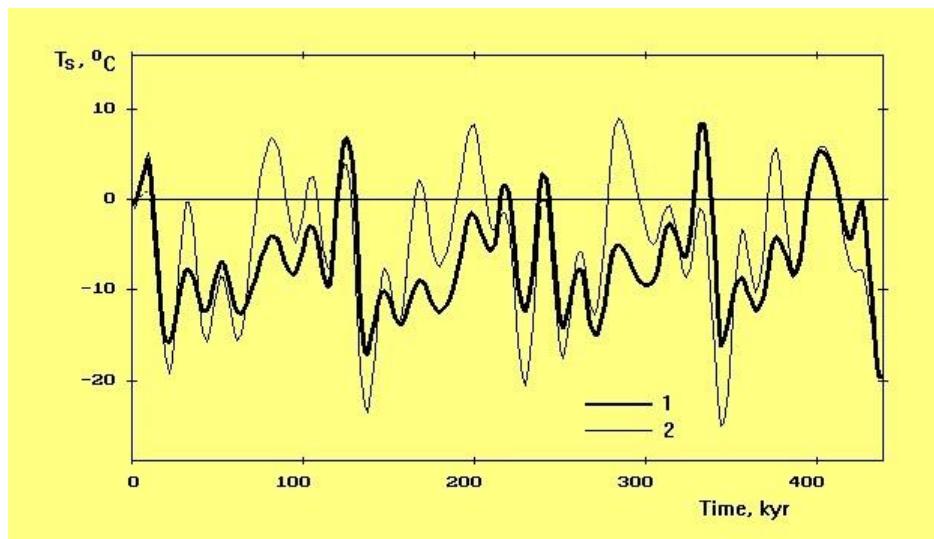
Конечно, ледник не помнит все климатические изменения температуры до полумиллиона лет в прошлом, но мы можем быть уверены в "недавних" 40-80 тыс лет. Этого достаточно, чтобы восстановить основные циклы – геофизический метроном – с точностью до белой зоны неопределенности и предсказать время основных температурных максимумов и минимумов в пределах $\pm 1-2$ тыс. лет. Сопоставим эти события с колебаниями изотопного состава ледниковых отложений по глубине и получим геофизическую шкалу возраста льда (точки). Это первое приближение.



Источник: Цыганова Е.А., Саламатин А.Н.

Первый шаг... Но, теперь мы знаем, как изменялось содержание дейтерия в осадках во времени. Нужно только найти коэффициент масштабирования, чтобы пересчитать временной изотопный профиль и получить уточненный, детальный ход температуры. Ясно, что для этого снова нужно добиться наилучшего согласования современного

профиля температуры, измеренного в глубокой скважине на ст. «Восток» с рассчитанным по модели. Кроме того, для надежной реконструкции потребуется и более точный расчет возраста льда на основе поля скоростей в ледниковом массиве, и, значит, не обойтись без одновременной реконструкции количества выпадающих осадков – аккумуляции льда на поверхности ледника, – изменения которой также связаны с колебаниями температуры и непосредственно отражаются в распределении изохрон. И, вот, наконец, мы готовы запустить итерационную компьютерную процедуру оптимизации на основе общей термогидродинамической модели ледникового покрова, чтобы решить так называемую обратную задачу и рассчитать возраст льда (сплошная красная линия), количество осадков, колебания высоты поверхности ледника и изотопную температуру за последние 500 тыс. лет (кривая 1 на следующем рисунке). Геофизический метроном (кривая 2) заметно "проигрывает" в точности определения амплитуд температурных колебаний.



Источник: Цыганова Е.А., Саламатин А.Н.

Так уточняется наша палеореконструкция. Возраст льда на ложе ледника в центральной части Антарктиды может превышать 1 млн. лет, а последнее оледенение 16-20 тыс. лет тому назад характеризовалось понижением температуры на 12-13 $^{\circ}\text{C}$.

Мы заглянули в прошлое! Математическое моделирование и компьютерные технологии стали нашим основным инструментом – нашим способом мышления!