УДК 551.321.1

Е.В.ПОЛЯКОВА
Геолого-разведочный факультет, группа МГП-04,
ассистент профессора

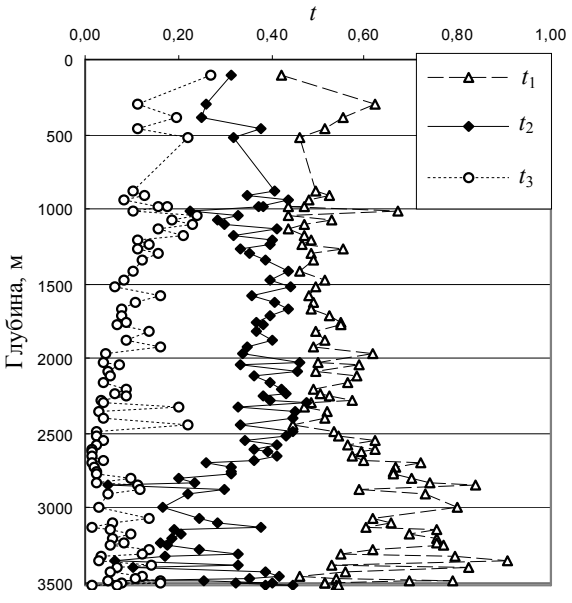
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ЛЕДЯНЫХ КЕРНОВ ИЗ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН НА СТАНЦИИ «ВОСТОК» (ЦЕНТРАЛЬНАЯ АНТАРКТИДА)

Впервые обработаны измерения ориентации оптических осей льда из глубоких скважин на станции «Восток» на 84 горизонтах в интервале глубин 104-3516 м, отлагавшегося более 400 тыс. лет. Показано наличие в его структуре сильной анизотропии. Рассчитаны статистические характеристики плотности пространственного распределения осей с его зерен, отражающие степень развития поясной и одномаксимумной структуры. Результаты расчетов согласуются с данными предыдущих исследований и указывают на смену по глубине различных режимов деформации льда. Установлено протекание процесса полигонизации при формировании наблюдаемой структуры. Гигантокристаллический лед нижней части ледника, вероятно, представляет собой пегматоидное образование.

Original measurements of the optic axis orientation from 84 ice horizons in the depth range of 104-3516 m at the Vostok Polar Station covering more than 400 thousand years of ice formation have been analyzed for the first time in the history. Presence of significant textural anisotropies is shown. Statistical characteristics of spatial distribution density of the axes revealing the degree of the girdle fabric and single maximum fabric development are calculated. The resulting curves conform to the previous data and show different regimes of ice deformation depending on various depths. A significant role of the polygonization process in formation processes is also observed. The giant-crystal ice at the lowest horizons is probably a pegmatoid formation.

Получение и комплексное исследование ледяных кернов с целью реконструкции палеоклимата и изучения подледникового оз.Восток – один из наиболее приоритетных научных проектов, выполняемых в настоящее время на российской внутриконтинентальной станции «Восток». В ходе реализации этого проекта были получены уникальные данные о химическом, изотопном, минеральном и биологическом составе антарктического льда, и об изменении его структуры и строения по разрезу ледниковой толщи. Эти данные несут большой объем информации о процессах, связанных с формированием ледника и, в частности, свидетельствуют о наличии двух структурных типов слоев льда с различными свойствами: мелкозернистого и крупнозернистого [1, 5]. Мелкозернистый лед содержит больше атмосферной пыли, замедляющей рост ледяных зерен. Повышенное содержание пыли во льду – признак того, что лед образовался в ледниковые периоды. Кроме того, мелкозернистый лед пластичнее крупнозернистого ввиду большей удельной площади межзеренных границ. Поэтому смена с глубиной одного типа льда на другой сопровождается сменой режима его деформации, оценить который можно по типу закономерности пространственной ориентировки кристаллографических осей ледяных зерен. Равномерное распределение осей соответствует отсутствию деформации. Поясное распределение соответствует деформации растяжения, характерной для участков конвергенции линий тока ледника, а одномаксимумное – либо деформации сжатия, либо деформации простого сдвига. Первый случай типичен для участков ледников вблизи ледоразделов, а второй – для нижних горизонтов льда [3].

Перекристаллизация льда может включать большое количество разнообразных



Результаты расчета параметров Бингхема для 84 горизонтов льда

явлений. Некоторые выводы об их роли в преобразовании структуры льда можно сделать по результатам измерения ориентации оптических осей кристаллов. Так, полигонизация (и только этот процесс) приводит к тому, что при прочих равных условиях углы между осями граничащих зерен меньше, чем между осями удаленных.

Целью настоящего исследования являлось получение статистических оценок, характеризующих, во-первых, плотности пространственного распределения кристаллографических осей ледяных зерен по всему разрезу ледниковой толщи, во-вторых, углы между осями контактирующих зерен.

Фактической основой проведенного исследования послужили оригинальные полевые материалы, которые были получены в ходе работ 25-42 российских (советских) антарктических экспедиций. Исходные данные включают результаты измерений ориентировок оптических осей кристаллов относительно видимых текстурных особенностей ледяного агрегата на глубинах от 104 до 3516 м, а также зарисовки структуры льда в шлифах. Материалы предоставлены сотрудником ААНИИ В.Я.Липенковым.

Расчет азимутов и углов погружения оптических осей кристаллов по результатам измерений на федоровском столике проводился при помощи таблиц Microsoft Excel. Затем по полученным данным с помощью программы StereoNett (Institute of Geology at Bochum University) для каждого горизонта были построены диаграммы ориентировки в равноплощадной проекции. Для оценки степени развития поясной и одномаксимумной ориентировки использовались параметры распределения Бингхема [4]:

$$f(c) = (4\pi d(K))^{-1} \exp(K_1(ct_1)^2 + K_2(ct_2)^2 + K_3(ct_3)^2),$$

где $f(c)$ – плотность осей в направлении c; c – вектор, представляющий ось, случайным образом извлеченную из генеральной совокупности; K – диагональная матрица концентраций с диагональными элементами K_1, K_2 и K_3; t_1, t_2 и t_3 – единичные векторы трех взаимно-перпендикулярных главных осей (параметры распределения Бингхема).

Плотности ориентировок осей в направлениях t_1, t_2 и t_3, τ_1, τ_2 и τ_3 таковы, что отношения τ_1/τ_2 и τ_1/τ_3 примерно равны отношениям t_1/t_2 и t_1/t_3 собственных чисел матрицы $T = D' \times D$ (где D – исходная матрица направляющих косинусов, D' – транспонированная матрица D).

Расчет параметров распределения Бингхема проводился по алгоритму [2] с использованием созданной нами программы Ice_axes (см. рисунок).

Далее при помощи другой авторской программы Ice_adjacent были получены распределения углов между граничащими и удаленными друг от друга зернами для шести горизонтов. Исходными данными для этой программы были два текстовых файла: с результатами расчетов в таблицах Excel и с парами номеров контактирующих зерен, определенными по зарисовкам структуры льда в шлифах. Для сравнения законов полученных распределений использовалась программа Statistica (StatSoft).

В ходе работы были впервые обработаны результаты измерений ориентировок оптических осей на 84 горизонтах ледниковой толщи. Для этих горизонтов были построены равноплощадные проекции ориентировок и получены количественные оценки

степени развития ледяных тектонитов двух типов: с поясным и одномаксимумным строением.

Гигантокристаллический лед нижней части ледника характеризуется участковым распределением в разрезе. Он образовался вблизи поверхности внутриледникового антарктического озера, способной аккумулировать озерные и глубинные (эндогенные) эманации, при температуре –1,9 °С, близкой к температуре плавления при соответствующем давлении (0,3 кбар). Можно допустить, что лед в таких условиях проявляет способность к активной собирательной перекристаллизации. Его гигантокристаллические агрегаты могут быть результатом такого процесса и, по мнению проф. М.А.Иванова, представляют собой пегматоидные образования.

Выводы

1. Изменение с глубиной параметров распределения пространственной плотности оптических осей определенным образом связано с измеренными ранее профилями состава и структурных характеристик льда, отражающих прошлые изменения климата.

2. Полученные результаты подтверждают и количественно характеризуют смену с глубиной различных режимов деформации льда, слагающего антарктический ледниковый покров.

3. Результаты оценки углов между соседними зернами на шести горизонтах ледниковой толщи свидетельствуют о существенной роли полигонизации в метаморфизме ледяной породы и указывают на целесообразность проведения в дальнейшем подобного исследования для большего числа горизонтов.

4. Лед нижней части антарктического ледника в районе оз.Восток по особенностям структуры, состава, форме залегания и условиям формирования характеризуется как особый вид пегматоидных образований – гляциопегматит.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Липенков В.Я.* История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного керна со станции «Восток» / В.Я.Липенков, Н.И.Барков, А.Н.Саламатин // Проблемы Арктики и Антарктики. СПб: Гидрометеоиздат, 2000. Вып.72.

2. *Чини Р.Ф.* Статистические методы в геологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1986.

3. *Alley R.B.* Fabrics in polar ice sheets: Development and prediction. Science. 1988. 240.

4. *Bingham C.* Distributions on the sphere and on the projective plane, PhD thesis, Yale University. 1964.

5. *Petit J.R.* Four Climatic Cycles in Vostok Ice Core / J.R.Petit, I.Basile, A.Leruyet and others. Nature. 1997. Vol.387.

Научные руководители: ведущий научный сотрудник ААНИИ *В.Я.Липенков*, д.г.-м.н. проф. *М.А.Иванов*