

ПРИРОДА ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТИРОВКИ КРИСТАЛЛОВ ЛЬДА В ЛЕДНИКОВОМ ПОКРОВЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ АНТАРКТИДЫ

В.Г.ПОРТНОВ

Изучение характера и природы кристаллооптической ориентировки в ледниковом покрове представляет весьма трудоемкую, но чрезвычайно важную задачу. Это связано с тем, что пространственное положение главных осей зерен отражает глубоко скрытые внутренние характеристики пород, самым тесным образом взаимосвязанные с особенностями формирования ледникового щита в целом. В предлагаемой статье делается попытка осветить эти вопросы, опираясь на результаты исследования керна льда скважины глубиной 952,5 м (стация "Восток").

Верхние горизонты ледникового покрова до глубины 29 м характеризуются беспорядочной оптической ориентировкой зерен. Признаки закономерной перестройки кристаллической структуры наблюдаются в интервале 30–35 м и сопровождаются появлением отчетливого максимума в центральной части стереограмм (рис. I, а). С нарастанием глубины эта тенденция проявлена еще более отчетливо (рис. I, б) и приводит к формированию кристаллически-зернистого агрегата с достаточно однообразной ориентировкой главных осей в интервале 330–340 м (рис. I, в). На более глубоких горизонтах величина угла отклонения осей C от вертикали закономерно уменьшается и на глубине 940–950 м не превышает $15-20^\circ$.

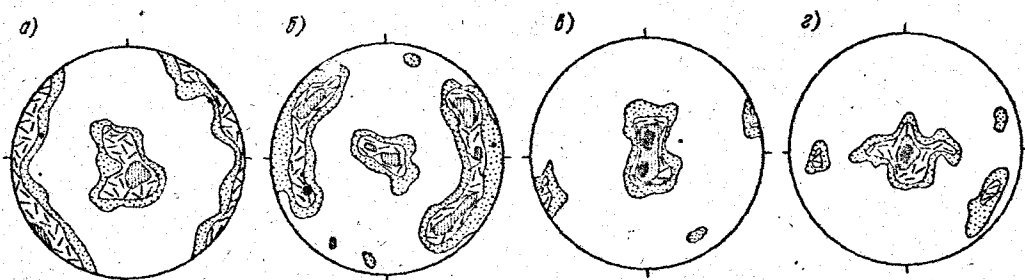


Рис. I. Стереодиаграммы ориентировки оптических осей зерен льда: а - глубина 33,8 м, 132 замера; б - глубина 96 м, 135 замеров; в - 340 м, 167 замеров; г - 638 м, 172 замера
Изолинии, соответствуют <1 , >1 , >5 , $>15\%$

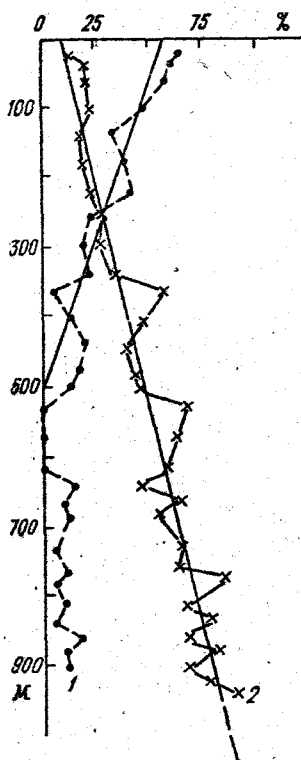


Рис.2. Изменение с глубиной относительного числа зерен с оптическими осями
1 — пологоориентированными (0-20°), 2 — крутоориентированными (70-90°)

Характерно, что относительное количество кристаллобластов с пологонаправленными осями с увеличением глубины уменьшается вплоть до полного исчезновения на глубине 525-530 м (рис.2). Одновременно возрастает относительное число зерен с крутоориентированными осями, которые на глубине 950 м составляют 93% от общего числа индивидов.

Несмотря на широкую известность самого факта предпочтительной ориентировки главных осей зерен льда в островных ледниках Арктического бассейна, в ряде горных и долинных ледников, в ледниковых щитах Гренландии и Антарктиды [1, 2, 5, 6, 11, 17, 19-21, 25, 30-32, 34, 35] единое мнение о природе этого явления отсутствует. Наибольшей популярностью в последние годы пользуется гипотеза, высказанная Д.Селигмэнсом [37] и развитая П.А.Шумским [25]. Согласно этим представлениям, формирование вертикальной, а в общем случае нормальной к ложу и направлению движения ледника ориентировки обусловлено скалывающими напряжениями, возникающими в процессе вязкопластического течения льда [26, 27]. Эта точка зрения представляется весьма интересной, но, к сожалению, не позволяет достаточно убедительно объяснить важнейшие особенности строения ледника в районе станции «Восток».

С позиции пластического течения трудно понять ранее установленную зависимость площади горизонтального сечения зерен льда от величины угла наклона оптических осей относительно горизонта [17]. Особо следует подчеркнуть тот факт, что не только размеры, но и степень идиоморфизма кристаллобластов тесным образом взаимосвязаны с оптической ориентировкой. Опубликованные данные свидетельствуют о том, что одновременно с увеличением угла наклона главных осей (приближением их к зениту) возрастает площадь горизонтального сечения и увеличивается степень идиоморфизма зерен [17].

Совершенно непонятна с рассматриваемых позиций и закономерная эволюция структурного рисунка льда. В частности, резко неравномернозернистые (порфириобластовые) породы верхней части разреза переходят в более равномернозернистые (гемигранобластовые) постепенно, с возрастанием глубины. Это приводит к формированию субравномернозернистого (эвгранобластового) кристаллического агрегата с прямолинейными очертаниями границ зерен (рис.3) и очень совершенной оптической ориентировкой в нижней части разреза. Характерно, что в изученных границах (в области развития ледникового льда) воздушные включения имеют только шаровидную форму, исключая возможность проявления пластических деформаций. При этом следы линейно-параллельных

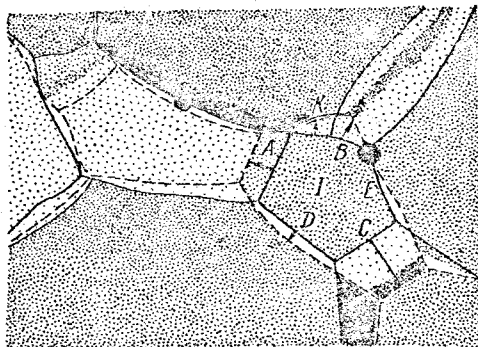


Рис.3. Зарисовка шлифа льда, горизонт 770 м
(ув. 15^x, николи X)

текстур, сложные, как отмечает П.А.Ильинский [25], взаимопращенные формы, вытянутые и сплюснутые в направлении движения зерна, пузырьки воздуха, явления катаклаза и связанные с ними оптические аномалии в кристаллоблестах отсутствуют. А ведь именно эти признаки наиболее отчетливо проявлены в ледниках и массивах горных пород, упорядоченная оптическая ориентировка минералов в которых сформирована в процессе пластического течения вещества [12, 16, 17, 25, 34].

Вместе с тем в границах изученного разреза отчетливые следы пластических деформаций со всеми перечисленными только что признаками фиксируются в горизонтально лежащих зонах кристаллизационной сланцеватости и подробно описаны ранее [17]. Приуроченность течения льда к локальным участкам толщи отмечалась и американскими исследователями для района станции Берд [30-33] и связана с реализацией сколовых напряжений. В структурно-текстурном отношении зоны сланцеватости резко отличаются от участков, не затронутых процессами динамометаморфизма. В первую очередь это относится к появлению в их пределах зерен микрокристаллического льда, размеры которых на два порядка меньше обычных. Но главное не в этом. Оптическая ориентировка здесь отличается существенно меньшим совершенством и характеризуется довольно значительным развитием зерен с пологонаправленными главными осями (см. рис.1, г). Следовательно, объяснить формирование предпочтительной кристаллографической ориентировки за счет пластического течения льда в условиях станции "Восток" невозможно.

Многочисленные лабораторные исследования керн льда показывают, что по контактам оптически неоднородно ориентированных кристаллоблестов наблюдаются оптические аномалии в виде полос и лент, околнуривающих зерно целиком или частично. На рис.3 они представлены яркими черными или белыми полосами и располагаются по внешнему периметру индивида, ось которого направлена ближе к зениту относительно соседнего зерна. Оптические аномалии фиксируют дефекты в кристаллической структуре, формирующиеся при срастании двух различно ориентированных зерен. Аналогичные нарушения тонкой структуры доказаны для горных пород, металлов и керамики [13, 18, 22].

При увеличении примерно в 25 000 раз поверхности разреза различно ориентированных кристаллических решеток железа представлены сеткой дислокаций, обуславливающей расплывчатые и нечеткие контуры зерен [15]. Сходная картина наблюдается при микроскопических исследованиях льда и была впервые описана Дж.Брайантом и Б.Масоном [29].

Исходя из фундаментальных положений генетической минералогии, в условиях стесненного роста (зернистого агрегата) развиваются и растут только те кристаллические индивиды, которые располагаются благоприятно относи-

тельно питающего потока [8, 9]. Применительно ко льду это выглядит следующим образом. Перенос вещества в процессе перекристаллизации, протекающей в условиях крайне низкой температуры (минус 49-58°C) [3, 28], осуществляется за счет явлений диффузии без участия жидкой фазы. Так как температурный градиент имеет положительные значения в пределах всего разреза, питающий диффузионный поток направлен вертикально вверх. В наиболее благоприятных условиях оказываются, очевидно, зерна, оптические оси которых располагаются параллельно тепловому потоку. В этой связи зерна, у которых оси C отклоняются от вертикали, обладают большим энергетическим потенциалом, чем зерна с меньшими углами отклонения осей от данного направления. Стремление к минимуму свободной энергии обуславливает разрастание зерен с субвертикальной оптической ориентировкой^х, с глубиной инако ориентированные ледяные частицы (см. рис.2) постепенно уменьшаются в размерах вплоть до полного исчезновения.

Наблюдения показывают, что миграция границ зерен направлена в сторону индивидов с относительно более пологой ориентировкой осей. Как уже отмечалось, поверхностная энергия их выше, чем у кристаллоблоков, согласных с направлением геотермического потока, и атомы диффундируют к зернам с меньшим энергетическим потенциалом. Этому благоприятствуют идентичность тонкой структуры соседних зерен и, что весьма важно, присутствие на их контакте дислокационной сетки [15]. В процессе движения границ контуры кристаллоблоков теряют отчетливые очертания, и вдоль фронта перекристаллизации намечается появление грани на новом уровне. Прежние контуры зерна представлены размытой сплошной линией, а его новые границы наблюдаются в виде своеобразного пунктира.

Скорость перемещения границ одного и того же индивида непостоянна и возрастает пропорционально уменьшению разности углов наклона оптических осей соприкасающихся зерен. В частности, у кристаллоблока I (см. рис.3) с наибольшей скоростью перемещается грань C , так как разница в ориентировке главных осей в этом направлении составляет всего 8° . Пропорционально увеличению этого параметра у соседних граней (A, B, D, E, K) уменьшается абсолютная скорость роста. При этом грани с максимальными относительными скоростями движения (A, B, C) сокращаются в размерах вплоть до полного зарастания (грань B). Приведенные данные хорошо согласуются с результатами прямых наблюдений диффузионных явлений в металлах методом электронно-микроскопической автораддиографии, описанных С.З.Бокштейном [4].

Таким образом, в толще ледника происходит своеобразный геометрический отбор, и выживает только те кристаллоблоки, оптические оси которых располагаются согласно с тепловым потоком, направленным вертикально вверх. В целом формируется субравномернозернистая порода полигональной структуры с весьма однообразной оптической ориентировкой зерен. Теоретически конеч-

^х Коэффициент удлинения у зерен этого типа на 10-15% выше, чем у индивидов с более пологими углами наклона главных осей, что свидетельствует о преимущественном росте их вдоль оси C .

ным результатом такого процесса является преобразование поликристаллического агрегата с избыточной поверхностной энергией в монокристалл, отвечающий минимальному энергетическому потенциалу. В этом смысле, высказанное в 1929 г. Г.Тамманом [36] предположение о том, что в связи с большим возрастом льда в Антарктиде материк может быть покрыт одним кристаллом льда, не кажется столь абсурдным, как это пытаются представить некоторые авторы.

Следовательно, в конкретной термофизической обстановке необходимым и достаточным условием роста зерен и образования предпочтительной ориентировки следует признать направление теплового потока. Впервые на эту закономерность обратил внимание Ф.Т.Троутон [39], но гипотеза не нашла должного развития ни в теории, ни в практике гляциологических исследований. Только в последние годы эти представления нашли новые подтверждения в исследованиях М.Перутца, Д.Селигмана [36] и наиболее убедительно показаны А.В.Черепановым [23, 24] для конгеляционного льда.

В заключение хочется еще раз подчеркнуть, что высказанные здесь взгляды не претендуют на универсальность и не отрицают возможности формирования в иных условиях предпочтительной ориентировки за счет пластического течения льда. Судя по результатам изучения ледников Северной Америки, Гренландии, Земли Франца-Иосифа, Антарктиды и других районов [1, 2, 5, 10-12, 19-21], в общем случае образование однообразной оптической ориентировки является следствием совместного воздействия на исходные ледяные породы явлений термо- и динамометаморфизма. Однако ориентированные структуры даже в рамках одного ледника могут быть созданы за счет действия только одной из указанных причин. В частности, в центральных зонах ледяных куполов, где абсолютные и относительные скорости движения льда весьма незначительны и часто близки к нулю [7, 14], предпочтительная оптическая ориентировка обязана своим происхождением гестермическому потоку. С другой стороны, интенсивные дифференциальные подвижки в рамках выводных частей этих же ледников приводят к переориентировке ранее созданных структур, так как избыточная поверхностная энергия, возникающая в системе под действием пластических деформаций, несравнимо выше энергии, возникающей под воздействием теплового потока. Этим можно объяснить наличие на стереограммах подвижных зон ледников нескольких максимумов, тогда как в стационарных областях ледников обычно отмечается только один максимум.

Л и т е р а т у р а

1. Барков Н.И. Предварительные результаты бурения ледникового покрова на станции „Восток“. Информ. бюлл. САЭ, 1970, № 80.
2. Барков Н.И. Результаты исследования скважины и ледяного керна на станции „Восток“ в 1970-1972 гг. Материалы гляциологических исследований (МГГ). Серия хроника, обсуждения, 1973, вып. 22. М., изд. Ин-та географии АН СССР.
3. Барков Н.И., Уваров Н.Н. Геофизические исследования скважины на станции „Восток“. Информ. бюлл. САЭ, 1973, № 85.
4. Бокштейн С.З. Диффузия и структура металлов. М., „Металлургия“, 1973.
5. Бочкарев А.И. Кристаллооптическая ориентировка ледникового покрова в центральной части Антарктиды. Тр. САЭ, 1974, т. 62.

6. Вейнберг Б.П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда. М.-Л., Гостехиздат, 1940.
7. Виноградов О.Н., Гросвальд М.Г. Движение льда ледников. В кн.: Оледенение Земли Франца-Иосифа. М., „Наука“, 1973.
8. Вульф Г.В. К вопросу о скорости роста и растворения кристаллических граней. Изв. Варшавск. ун-та, 1895, кн. 7-9; 1896, кн. 1-2.
9. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Изд-во Львовск. ун-та, 1961.
10. Гросвальд М.Г., Псарева Т.В. Структурный разрез ледникового купола Чурлениса. Материалы гляциологических исследований (МГИ). Серия хроника, обсуждения. 1961, вып. 2. М., изд. Ин-та географии АН СССР.
11. Гросвальд М.Г., Псарева Т.В. Структура льда. В кн.: Материалы гляциологических исследований (МГИ). Серия Земля Франца-Иосифа, 1962, вып. 6. М., изд. Ин-та географии АН СССР.
12. Гросвальд М.Г., Псарева Т.В. Метаморфизм льда. В кн.: Оледенение Земли Франца-Иосифа. М., „Наука“, 1973.
13. Елисеев Н.А. Основы структурной петрологии. Л., „Наука“, 1967.
14. Капица А.П. О зависимости формы купола Восточной Антарктиды от рельефа подледного ложа и характера растекания льда. Информ. бюлл. САЭ, 1958, № 1.
15. Мак-Лян Д. Метаморфизм в металлах. В кн.: Природа метаморфизма. М., „Мир“, 1967.
16. Поротов В.Г. Тектонические движения и протоматматические структуры. Зап. ЛГИ, 1971, т. 80, вып. 2.
17. Портнов В.Г. Строение ледникового покрова в районе станции „Восток“. Тр. САЭ, 1975, т. 65.
18. Раст Н. Образование центров кристаллизации и рост метаморфических минералов. В кн.: Природа метаморфизма. М., „Мир“, 1967.
19. Ригсби Дж. Ориентировка кристаллов льда в ледниках и искусственно деформированных образцах. Материалы гляциологических исследований. (МГИ). Серия хроника, обсуждения, 1961, вып. 2. М., изд. Ин-та географии АН СССР.
20. Токмагамбетов Г.А. Структура льда в зоне обляции ледника центрального Туюк-суйского. В кн.: Гляциологические исследования в период МГИ. Заилийский и Джунгарский Алатау. Вып. 2, Алма-Ата, изд. АН КазССР, 1962.
21. Токмагамбетов Г.А. Ориентировка кристаллов льда в ледниках Заилийского Алатау. Материалы гляциологических исследований. Серия хроника, обсуждения, 1964, вып. 9. М., изд. Ин-та географии АН СССР.
22. Флини Д. Деформация при метаморфизме. В кн.: Природа метаморфизма. М., „Мир“, 1967.
23. Черепанов Н.В. Роль термического режима волема в формировании кристаллической структуры льда. В кн.: Проблемы Арктики и Антарктики. 1968. Вып. 29. Л., „Морской транспорт“.
24. Черепанов Н.В., Камышников А.В. Размеры и форма кристаллов конгеляционного льда. Тр. ААНИИ, 1971, т. 300.
25. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М., Изд-во АН СССР, 1955.
26. Шумский П.А. Движение ледников. ДАН СССР, 1961, т. 137, № 1.
27. Шумский П.А. К теории движения и колебания ледников. Материалы гляциологических исследований. Серия хроника, обсуждения, 1962, вып. 6. М., изд. Ин-та географии АН СССР.

28. Barkov N.I., Vostretsov R.N. and Putikov O.F. Antarctic Journ. March/April, v.X, N 2, 1975.
29. Bryant G.W., Mason B.J. Phil. Mag., 5. ser.8, 1960.
30. Gow A.J. Reprinted from JSAGE Symposium, Hanover, USA, 3-7 Sept., 1968.
31. Gow A.J. Journ. of Geoph. Research, v. 76, N 11, 1971.
32. Gow A.J. Journ. Antarctic, v. VI, N 5, 1971.
33. Gow A.J., Vedo H.T. and Garfield D.E. Journ. Science, v.161, 1968.
34. Drigalski E. Grönland-Expedition der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin. 1891-1893, I, 1897.
35. Drigalski E. Deutsche Südpolarexpedition 1901-1903. 1(4), Berlin, 1921.
36. Peruts M.F. and Seligman G. Proc. Roy. Soc., ser. A, v. 172, N 950, 1939.
37. Seligman G. Geogr. Journ., v. XCVII, N 5, 1941.
38. Tammann G. Naturwissenschaften, 17 (44), 1929.
39. Trouton F.T. Proc. Roy. Soc. Dublin, 8, II, 1840.