

ПРИРОДА ВОЗДУШНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЛЕДНИКОВОМ ПОКРОВЕ АНТАРКТИДЫ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРНА ЛЬДА)

В.Г.ПОРТНОВ

При изучении льда по керну скважин глубиной 250; 75 и 952,5 м, пробуренных соответственно в 50 км, 353 км и на станции Восток, выделены два типа воздушных включений. Первые из них прослеживаются до глубины 940 м и обязаны своим происхождением рыхлой упаковке кристаллов атмосферного льда в процессе аккумуляции. В снежной толще полости этого типа располагаются между агрегатами сближенных зерен и выполнены атмосферным воздухом. Так как они образовались одновременно с явлениями седиментации и диагенеза снега, то их можно считать первичными. Форма этих полостей сложная, неправильная и зависит от конфигурации контактирующих частиц. Размеры колеблются от долей миллиметра до 3-4 мм, а в пределах горизонтов глубиной изморози составляют 50-70 мм по удлинению.

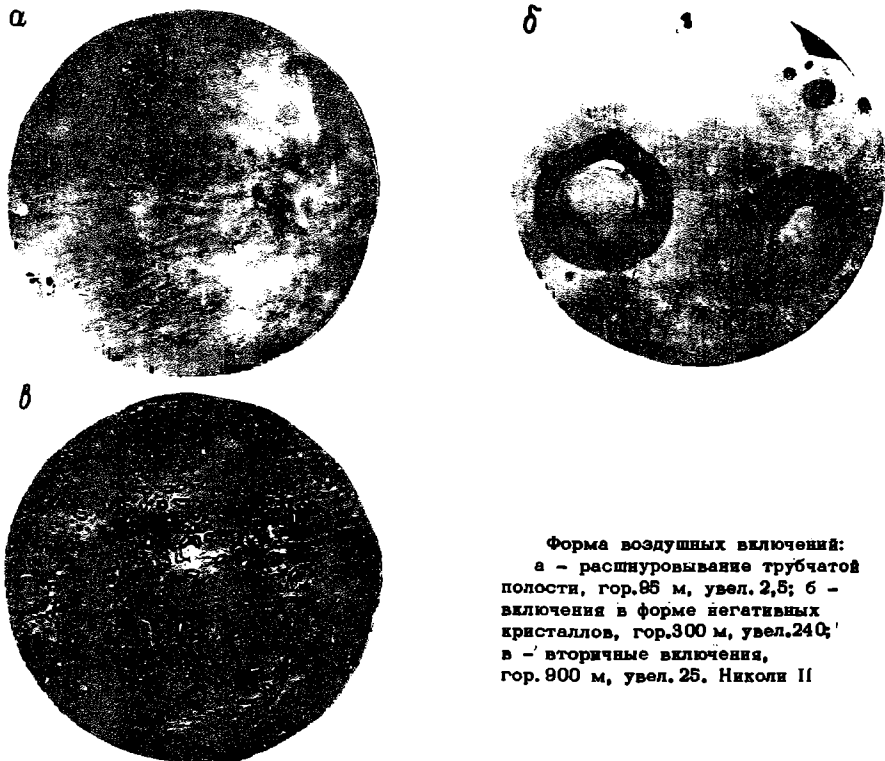
Снег переходит при плотности осадков $0,55 \text{ г/см}^3$ в фирн [11]. В дальнейшем плотность фирна возрастает за счет перекристаллизации зернистого агрегата. Рост зерен обуславливает перемещение и концентрацию воздушных полостей по границам кристаллообластов^х. Этот процесс заканчивается в области перехода фирна в лед и приводит к формированию пор ветвистого, трубчатого или сферического облика, локализованных по контактам зерен. Величина первых по удлинению достигает 1,5 мм, вторых - 0,3-0,8 мм. Наиболее мелкие из них (менее 0,2 мм) имеют шаровидную форму.

В области материкового льда преобразование облика пор отличается от рассмотренного. Ветвистые и трубчатые включения, как типоморфные для верхних горизонтов льда, широко представлены лишь на глубине 60-80 м^{хх}. Ниже по разрезу их относительное число заметно уменьшается и они "втесняются" сферическими индивидами. Глубже 110-120 м удлиненные полости вообще не встречаются и сменяются изометричными пузырьками и включениями в форме негативных кристаллов.

^х Зерна, возникшие при перекристаллизации агрегата в твердом состоянии, т.е. в процессе бластеза.

^{хх} По данным А.И.Баркова, переход фирна в лед осуществляется на глубине 85-106 м [1, 2].

Изменение формы трубчатых индивидов во всех наблюдаемых случаях протекало однообразно. На первом этапе в удлиненных полостях образуются пережимы (рисунк, а). На месте ранее существовавшего трубчатого включения формируются два каплевидных тела, острия которых направлены навстречу друг другу. В дальнейшем заостренные концы исчезают и включения принимают облик, близкий к изометричному. При расшнуровывании резко удлиненных индивидов обычно появляется несколько пережимов, а позднее образуется цепочка каплевидных или овальных полостей.



Форма воздушных включений:
а - расшнуровывание трубчатой
полости, гор. 86 м, увел. 2,5; б -
включения в форме негативных
кристаллов, гор. 300 м, увел. 240;
в - вторичные включения,
гор. 900 м, увел. 25. Николи II

Ниже по разрезу до глубины 300-320 м происходит преобразование трубчатых в шаровидные тела одновременно с уменьшением поперечника от 0,4-0,6 до 0,15-0,20 мм. Ниже указанного интервала поры представлены только шаровидными индивидами с постоянно уменьшающимся диаметром. Последние опорадические включения были отмечены на глубине 940 м и имели поперечник 0,008 мм. В дальнейшем, до максимально изученной глубины 952,5 м, воздушные включения встречены не были^х.

Полости в форме отрицательных кристаллов отчетливо прослеживаются в интервале 60-200 м, а отдельные индивиды встречаются на глубине 450-500 м. Однако овальные, изометричные и шаровидные поры имеют соответствующий об-

^х Переход мелкопузыристого льда в массивный по кернам льда на станции Бэрд зафиксирован в интервале 800-1200 м [10].

лик (фактически псевдооблик) лишь при малых увеличениях. Все типы включений при 200–300-кратном увеличении даже на глубине 600–900 м „одеты“ в грани, имеющие слабо вогнутые в сторону полости очертания (рисунков, б), тогда как на более высоких горизонтах характеризуются плоскими границами. Вершины и ребра заметно округлены, а грани имеют исчезающе малую площадь. Облик негативных кристаллов до глубины 300–320 м средне-длинностолбчатый, ниже этого интервала он переходит в короткостолбчатый, изометричный. Габитус призматический, пирамидальный, чаще дипирамидальный (рисунков, б). Простые формы представлены двумя моноэдрами, двумя примерно одинаково развитыми тригональными призмами и двумя тригональными дипирамидами.

Анализ формы включений показывает, что с нарастанием глубины прослеживается совершенно закономерная тенденция к образованию пор в виде негативных кристаллов. Процесс совершается достаточно постепенно и эволюция облика включений с нарастанием глубины можно представить следующим рядом: неправильные полости сложных очертаний → ветвистые → трубчатые → шаровидные → в форме негативных кристаллов. Рассматривая энергетическую сторону этого ряда, нетрудно заметить, что изменение облика направлено к созданию равновесной формы, которая, согласно принципу Гиббса–Вульфа–Кюри, обладает минимумом свободной энергии. Сказанное не относится к порам сложной формы, так как их облик изменяется за счет механического перемещения и явлений перекристаллизации зернистого агрегата в снежно-фирновых отложениях.

Как известно, воздушные включения представляют собой объемные („трехмерные“) дефекты структуры и концентрация вакансий вблизи их поверхности значительно выше, чем в бездефектной части зерен [3, 4]. Это вызвано тем, что изогнутая поверхность поры сжимается лапласовским давлением, тогда как пограничная зона кристаллообласта оказывается растянутой теми же силами. Обусловленная этим разность концентрации вакансий предопределяется их диффузией и является причиной переотложения вещества в замкнутой системе. Суть этого явления состоит в следующем. Когда в непосредственной близости оказываются дислоцированный атом и вакансия, то при необходимой флуктуации энергии атом переходит на место вакансии. Путем многократного обмена позициями атомы и вакансии удаляются друг от друга. В нашем случае необходимой для диффузии атомов (вакансий) энергией является избыточная свободная энергия стенок полости. Различие концентрации вакансий на поверхности поры и в удалении от нее обеспечивает направленный диффузионный поток дислоцированных атомов, которые достраивают недостающие узлы в кристаллической решетке по границе воздушного включения. Иными словами, происходит переотложение вещества в замкнутой системе. Так как выпуклые элементы поверхности пор имеют большую растворимость, чем плоские, а плоские большую, чем вогнутые [4, 6], происходит закономерная перестройка шаровидных полостей в негативные кристаллы с плоскими, а позднее с вогнутыми гранями. Следовательно, эволюция облика пор осуществляется за счет объемной и поверхностной диффузии вакансий, вызванной избыточной свободной энергией стенок полостей. Характерно, что похожим образом протекает заживление трещин в минералах, которое описано Г.Г.Деммелем на примере кварца, галенита, берилла, флюорита, натровой селитры, аквамарина и топаза [5, 6, 7].

С созданием равновесной формы заканчивается изменение облика воздушных включений. Дальнейшее нарастание глубины сопровождается только сокращением размера воздушных включений, что указывает на практически полное прекращение поверхностной диффузии и свидетельствует о течении только объемной диффузии. В силу ранее указанных причин, осуществляется направленный поток вакансий от стенок пор в сторону бездефектной части зерен (по образному выражению Я.Б.Гегузина «атомов пустот»), чем, собственно, и объясняется диффузионное течение кристаллообласта в полость. Атмосферный воздух, сжимаемый стенками полости при сокращении ее размера до исчезающе малой величины, мигрирует, на наш взгляд, в открытые каналы кристаллической решетки, существование которых убедительно доказано [9]. Этой причиной объясняется и тот факт, что при плавлении в керосине беспузырчатого льда с глубины 935–952 м от образцов ядра поднимаются тонкие струйки воздуха.

В отличие от рассмотренных, воздушные включения второго типа наблюдаются по всему разрезу с интервала 50–60 м вплоть до горизонта 952,5 м. С глубиной частота их проявления прогрессивно нарастает, достигая максимума в нижней части толщи и особенно в зонах кристаллизационной сланцеватости [8]. Наблюдения свидетельствуют, что полости этого типа пространственно связаны с горизонтальными трещинами отрыва и располагаются в их полости. Горизонтальные трещины рассекают образцы ядра льда и формируются при снятии горного давления в процессе бурения. Они являются вторичными.

Морфология пор своеобразна и не зависит от глубины. Во всех без исключения примерах поры располагаются в виде горизонтально ориентированных зон и по форме напоминают ихтиоглипы кварца в письменном граните (рисунок, в). Как правило, включения имеют трубчатый, коленообразный, овальный или сферический облик с ярко выраженной ориентировкой по форме. Ветви второго порядка образуют с преобладающим направлением углы $100-130^\circ$, что позволяет предположить взаимосвязь их ориентировки с определенными кристаллографическими направлениями. Характерно, что включения рассекают поликристаллический агрегат льда, независимо от границ отдельных индивидов.

Таким образом, особенности морфологии воздушных полостей, пространственная взаимосвязь с наложенными горизонтальными трещинами, характер взаимоотношений с зернами и независимость облика от глубины убедительно показывают, что образование рассматриваемых включений не связано с особенностями формирования ледника и обусловлено снятием горного давления в процессе бурения.

Так как мощность вторичных трещин, по крайней мере в выклинивающейся части, имеет капиллярные размеры, происходит их расщуривание и образование изолированных замкнутых систем [5]. В более широкой части нарушения, у входа его в образец ядра, некоторое время осуществляется обмен с атмосферным воздухом и многократное отложение его водных запасов в полости трещин. В результате широкая часть разрыва залечивается и в его плоскости формируется серия замкнутых воздушных включений.

В шлифах, изготовленных сразу после извлечения ядра льда из скважины, вторичные поры достигают размеров $0,2 \times 1,4$ мм. Через сутки их размер сокра-

щается до 0,04х0,8 мм. В первом случае их форма отличается сложностью очертаний, а во втором – включения наблюдаются в виде трубчатых и шаровидных пор. Фактически совершается процесс залечивания трещин, который после отпиливания широкой части разрыва протекает в замкнутой системе и принципиально не отличается от рассмотренного выше. При длительном хранении керна в условиях, близких к его естественному залеганию, процесс залечивания трещин протекает фактически в изотермических условиях и растянут во времени на 2,5–3 месяца. В шлифах, изготовленных через 3 месяца после извлечения керна из скважины, вторичные воздушные включения не отмечаются.

При измерении давления газа в воздушных включениях по методике, разработанной П.А.Шумским, данные полученных наблюдений оказались нереально низкими, поскольку в процессе формирования и последующего залечивания вторичных включений большая часть первичных пузырьков оказалась вскрытой и заполненной атмосферным воздухом. Это необходимо учитывать и при изучении газового состава пор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барков Н.И. Предварительные результаты бурения ледникового покрова на станции Восток. Информ. бюлл. Советской антарк. экспед., № 80, Л., 1970.
2. Барков Н.И. Результаты исследования скважины и ледяного керна на станции Восток в 1970–1972 гг. В кн.: Материалы гляциологических исследований (МГИ). Хроника, обсуждения, вып. 22. М., 1973.
3. Бакштейн С.З. Диффузия и структура металлов. М., „Металлургия“, 1973.
4. Гегузин Я.Е. Макроскопические дефекты в металлах. М., Metallurgizdat, 1962.
5. Леммлейн Г.Г. Процесс залечивания трещины в кристалле и преобразования формы полостей вторичных жидких включений. – ДАН СССР, 1951, т. 78, № 4.
6. Леммлейн Г.Г. К теории залечивания трещин в кристалле и о равновесной форме отщипательного кристалла. – ДАН СССР, 1953, т. 89, № 2.
7. Леммлейн Г.Г. Вторичные включения жидкости в минералах. В кн.: Морфология и генезис минералов. М., „Наука“, 1973.
8. Портнов В.Г. Строение ледникового покрова в районе станции Восток. – Тр. Советской антарк. экспед., т. 65, Л., 1975.
9. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л., Гидрометеиздат, 1975.
10. G o w A.J. Reprinted from ISAGE Symposium. Hanover, USA, 3–7 Sept., 1968.
11. L a n g w a y C.C. U.S. Army CRREL, Hanover, New Hampshire, The Geological Society of America, 1970.