

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

П. А. ШУМСКИЙ

**К ВОПРОСУ О ПАССИВНОМ ОРИЕНТИРУЮЩЕМ ВЛИЯНИИ
ТВЕРДОГО ОСНОВАНИЯ НА НАРАСТАЮЩИЕ КРИСТАЛЛЫ**

(Представлено академиком В. А. Обручевым 7 IX 1953)

В формировании структуры * поликристаллических агрегатов большую роль играют явления ориентированного нарастания кристаллов на твердое основание. Понимание причин возникновения той или иной упорядоченной ориентировки нарастающих кристаллов имеет первостепенное значение, например, в геологии для выяснения генезиса жильных полезных ископаемых и установления их поисковых признаков и в металлургии для получения требуемой структуры и качества отливок. В последнее время этот вопрос приобрел значение также в ледоведении для анализа условий формирования широко распространенных в области «вечной» мерзлоты ископаемых льдов, которые прежде считались остатками четвертичных ледников или фирновых полей, но в действительности оказались жильными образованиями — продуктами многократно повторяющегося процесса нарастания кристаллов льда на стенки морозобойных трещин.

Ориентированное нарастание кристаллов на твердое основание обусловлено ориентирующим влиянием основания, имеющим сложную и в разных условиях неодинаковую природу. Следует различать два совершенно различных типа ориентирующего влияния основания на нарастающие кристаллы, для обозначения которых можно воспользоваться удачными терминами Д. П. Григорьева (1) — «активное» и «пассивное» ориентирующее влияние.

Сущность активного ориентирующего влияния, проявляющегося только у кристаллического субстрата при наличии полного или частичного изоморфизма ** его с нарастающими кристаллами, в принципе ясна: она заключается в затравочном действии кристалла-основания. Значительно меньше ясности в вопросе о пассивном ориентирующем влиянии основания, под которым я подразумеваю все остальные воздействия последнего на нарастающие кристаллы.

Один из видов пассивного ориентирующего влияния является чисто механическим, но действие его ограничено только первоначально свободными кристаллами, зародившимися в жидкой или газообразной среде, которые, опускаясь или всплывая, прижимаются силой тяжести и прилипания к субстрату чаще всего наиболее развитой гранью. В этом случае, следовательно, появление упорядоченной ориентировки в процессе механического вращения перед фиксацией положения связано со стремлением кристаллов занять положение равновесия, обусловленное их формой.

* Термин «структура» применяется здесь в смысле петрографическом, в данном случае соответствующем «текстуре» кристаллографов.

** Частичный изоморфизм или «изоморфизм второго рода», касающийся не всей кристаллической решетки, а лишь одной или части ее плоских сеток, может приводить к явлениям ориентированного нарастания кристаллов, известным под именем эпитаксии.

В большинстве случаев, однако, кристаллы зарождаются непосредственно на поверхности субстрата и фиксированы в своем положении с момента зарождения. Поскольку, как легко доказать, при отсутствии затравочного действия зародыши кристаллов всегда ориентированы беспорядочно, пассивное ориентирующее влияние основания в этих условиях, очевидно, может осуществляться только в процессе отбора кристаллических зародышей — развития лишь тех из них, которые обладали данной, почему-либо более выгодной ориентировкой*. Можно предполагать также, что влияние основания в процессе отбора зародышей заключается в изменениях условий роста или растворения по-разному ориентированных кристаллов.

Для объяснения причин и механизма процесса отбора кристаллических зародышей выдвигался принцип наибольшего сопротивления растворения (для полярных кристаллов) (3), затем более общий принцип минимума удельной поверхности или удельной поверхностной энергии (4), а также противоположные им принципы наибольшей скорости роста и наибольшей удельной поверхности (поверхностной энергии) (5, 6). Предполагалось, следовательно, что в условиях медленной кристаллизации, допускающих возможность временных недосыщений, вырастают те зародыши, которые скрыли легко растворимую грань в основание (для полярных кристаллов), или вообще те, которые приросли к основанию наибольшей гранью и поэтому обладают наименьшей величиной соприкасающейся с раствором поверхности, оказывая наибольшее сопротивление растворению; и наоборот, что в условиях быстрой кристаллизации, когда возможность временного растворения исключена, вырастают зародыши с наибольшей скоростью роста или наибольшей свободной удельной поверхностью.

Однако произведенная автором попытка применить перечисленные принципы для объяснения явлений нарастания кристаллов льда показала полную несостоятельность их в этом случае и, следовательно, отсутствие удовлетворительного общего решения проблемы пассивного ориентирующего влияния основания.

Многочисленные прежние исследования нарастания кристаллов льда на твердое основание не только не дали объяснения причин ориентированного нарастания, но не выявили в достаточной мере даже фактическую картину существующих типов нарастания. Для решения этого вопроса в Центральной лаборатории Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева Академии наук СССР была проведена серия экспериментов по замораживанию воды в различных условиях с последующим измерением ориентировки оптических осей выросших на твердое неизоморфное основание кристаллов льда на универсальном столике Федорова и обработкой результатов по методу Шмидта.

Эксперименты и наблюдения над нарастанием кристаллов льда в природе показывают, что в зависимости от условий кристаллизации ориентировка нарастающих кристаллов может изменяться в пределах от линейной главными осями нормально к основанию, через хаотическую до поясной главными осями параллельно основанию (см. рис. 1). Непрерывному изменению ориентировки в указанных пределах соответствует такое же изменение температурного градиента (или градиента давления пара для сублимационных кристаллов) по направлению нормали к основанию от бесконечно большого положительного, через нулевой до бесконечно большого отрицательного**.

* Этот процесс не следует смешивать с так называемым геометрическим отбором во время роста агрегата кристаллов (2), так как, в отличие от геометрического отбора, он осуществляется без взаимодействия соседних кристаллов друг с другом.

** Положительный температурный градиент соответствует охлаждению со стороны основания, отрицательный — охлаждению в противоположном направлении.

Мелкие неровности основания, не влияющие на контуры переохлажденного (пересыщенного) слоя, не оказывают влияния на ориентировку

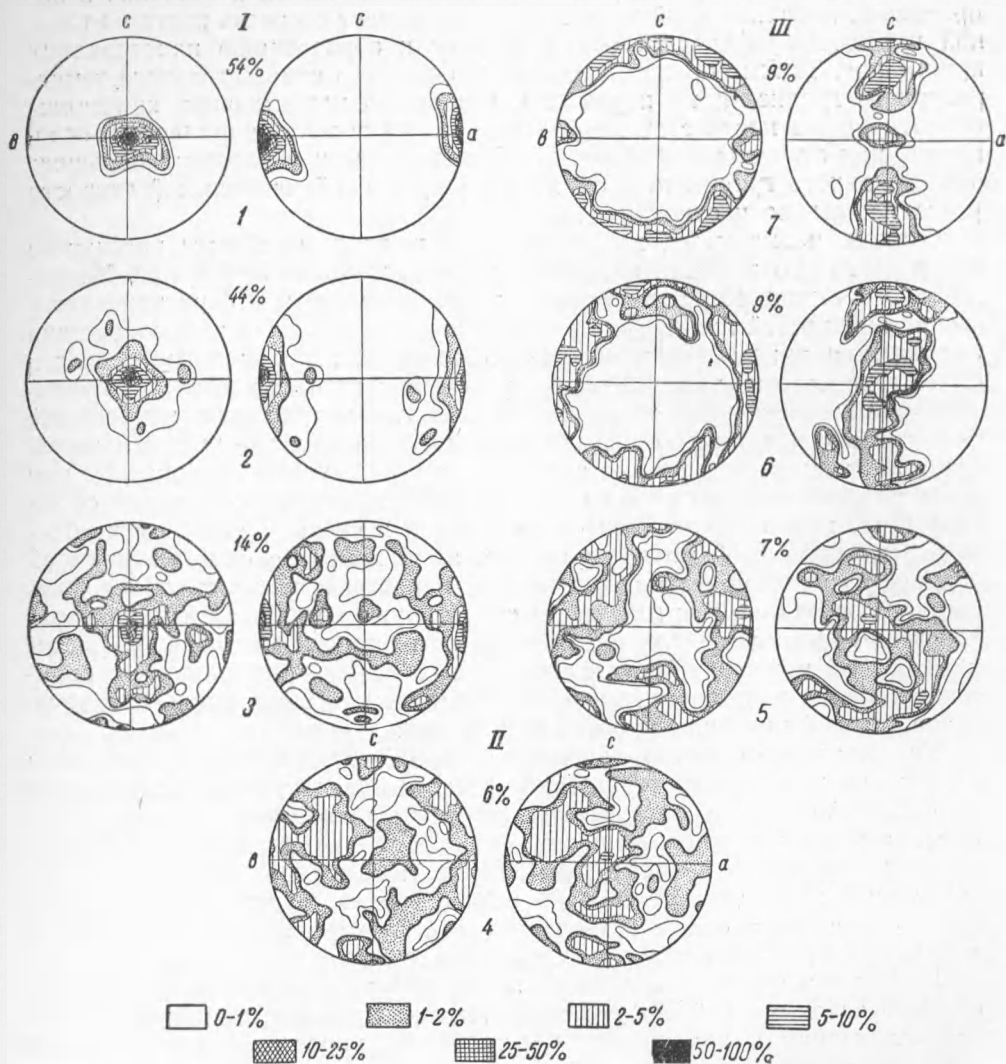


Рис. 1. Ориентировка главных осей кристаллов льда, выросших на плоское твердое неизоморфное основание в различных условиях замораживания.

I. Охлаждение со стороны основания. 1 — быстрое охлаждение (температура источника холода — 35°), опыт 22, кристаллов 80; 2 — температура источника холода — 20° , опыт 25, кристаллов 100; 3 — медленное охлаждение (температура источника холода — 6°), опыт 26, кристаллов 200.

II. Равномерное переохлаждение всей массы воды. 4 — опыты 4 и 6, кристаллов 150.

III. Вода холоднее основания. 5 — опыт 7, кристаллов 100; 6 — опыт 15, кристаллов 130; 7 — опыт 3, кристаллов 105.

Стереогаммы даны в двух проекциях. *bc* — Плоскость основания, *a* — нормаль к плоскости основания. Цифры сверху между стереогаммами указывают наибольшую концентрацию точек. Разной штриховкой показана концентрация точек выхода главных кристаллографических осей на площади в 1% поверхности полусферы (в % от общего числа). Тонкие линии — линии равной концентрации точек; жирные линии — линии концентрации точек 1%

нарастающих кристаллов, а более значительные неровности увеличивают хаотичность (упорядоченной) ориентировки.

В том интервале температур кристаллизации, к которому относятся указанные эксперименты и наблюдения, кристаллы льда обладают резко

выраженной анизотропией скорости роста, величина которой, само собой разумеется, возрастает по мере увеличения переохлаждения или пересыщения, а именно, скорость роста в базисной плоскости и особенно в направлении побочных осей значительно превышает скорость роста по главной кристаллографической оси, что ведет к образованию пластинчатых кристаллов. Таким образом, в условиях большого положительного температурного градиента по нормали к основанию нарастающие кристаллы ориентированы плоскостью наибольшей скорости роста параллельно основанию, при отсутствии градиента — беспорядочно и в условиях большого отрицательного градиента — одним из направлений наибольшей скорости роста нормально к основанию.

Отсюда, повидимому, вытекает общее решение проблемы пассивного ориентирующего влияния основания на нарастающие кристаллы. Упорядочение ориентировки нарастающих кристаллов путем отбора кристаллических зародышей происходит в результате наложения и взаимодействия анизотропии кристаллов в отношении скорости роста и анизотропности среды в отношении условий роста кристаллов: из всех хаотически ориентированных зародышей вырастают только те, направление наибольшей скорости роста которых ориентировано в ту сторону, где имеются достаточно благоприятные условия для роста, а остальные не развиваются или даже разрушаются во время роста крупных кристаллов. Наличие обоих указанных видов анизотропии — кристаллов и среды — является необходимой предпосылкой процесса отбора, а их величина определяет собой степень упорядоченности ориентировки нарастающих кристаллов. Роль твердого основания при пассивном ориентирующем влиянии его на нарастающие кристаллы заключается в возбуждении кристаллизации (шероховатостями поверхности), в фиксации положения кристаллов, в ограничении объема, в котором протекают процессы кристаллизации, и в изменении условий питания растущих кристаллов.

Условия кристаллизации расплавов способствуют возникновению типа нарастания кристаллов, характеризующегося ориентировкой направления наибольшей скорости роста кристаллов параллельно основанию, а условия кристаллизации растворов и паров, наоборот, типа нарастания, характеризующегося ориентировкой направления наибольшей скорости роста кристаллов нормально к основанию. Это, однако, не исключает возможности появления в отдельных случаях любого характера ориентировки в результате кристаллизации как расплава, так и раствора или пара.

Вместе с этим общим выводом проведенные исследования установили наличие закономерной связи между температурой основания во время кристаллизации и характером ориентировки нарастающих кристаллов льда, что дает возможность путем исследования структуры жильных ископаемых льдов определять температуру вмещающих горных пород во время формирования льдов и таким образом реконструировать историю мерзлоты и климата областей распространения ископаемых льдов.

Институт мерзлотоведения им. В. А. Обручева
Академии наук СССР

Поступило
20 VI 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. П. Григорьев, *Природа*, № 9, 25 (1947). ² Г. Г. Леммлейн, *ДАН*, 48, № 3, 177 (1945). ³ F. Becke, *Tschermaks miner. und petrogr. Mitteil.*, 10, H. 6, 464 (1889). ⁴ O. Mügge, *Neues Jahrb. Miner., Geol. u. Paläont.*, 16, 335 (1903).
⁵ A. Johnsen, *ibid.*, 23, 237 (1907). ⁶ J. Holzner, *Zs. Kristallogr. u. Miner.* 57, H. 3, 161 (1927).