

Н. Я. СЕЛЯКОВ

## НЕКОТОРЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НАДО ЛЬДОМ И ПРОЦЕССАМИ, СВЯЗАННЫМИ С ЕГО ОБРАЗОВАНИЕМ

*(Представлено академиком С. И. Вавиловым 21 XII 1949)*

Настоящая небольшая заметка имеет своей целью изложить некоторые результаты наблюдений и опытов, которые автор вел над процессами образования льда как в естественных условиях замерзания речного потока р. Вологды, так и в искусственных условиях замораживания небольшого объема воды.

Выявление границ отдельных кристаллов льда и их ориентированности относительно поверхности замерзающей воды. При изучении льда прежде всего возникает вопрос о величине кристаллов, образующих ледяной покров. Для того чтобы сделать границы кристаллов льда видимыми, нами были применены три различных приема.

Один из них заключался в том, что изучаемый образец льда, взятый с поверхности замерзшей воды, а следовательно, плоский, «выветривался» на воздухе при температуре ниже нуля. Через сутки и больше на выставленном образце явно обнаружались границы кристаллов, четко видимых на поверхности ледяной пластинки. «Выветривание» по границам между кристаллами идет быстрее.

Второй прием заключался в своеобразном травлении плоской поверхности льда. Кусок льда с мороза вносился в помещение с более высокой температурой. Тогда, как правило, холодный предмет «отпотевает». «Отпотевшая» таким образом поверхность льда в отраженных лучах явно обнаруживает границы кристаллов. Повидимому, толщина слоя воды, осевшей на кристалликах льда, имеющих слегка различную ориентировку, различна, а потому и отражательная способность поверхности разных кристаллов будет разная. Границы кристаллов, вскрытые первым приемом, сохраняются на поверхности льда долгое время. Второй прием в этом отношении менее выгоден, но позволяет чем-либо острым обвести обнаруженные границы кристаллов.

Наконец, третий прием состоит в том, что лед в форме пластинки просвечивается пучком лучей от проекционного фонаря и на экране рассматривается его изображение. Вначале просвечиваемое поле вполне однородно. Затем, с течением времени, появляются отчетливо видимые границы отдельных кристаллов. По границам кристаллов, как известно, всегда имеется достаточное количество примесей и просто «грязи», притом значительно больше, нежели в самой массе кристаллов. Кроме того, на границах между кристаллами льда образуются области с повышенным содержанием солей и газов, температура кристаллизации и плавления которых ниже температуры таяния чистого льда. Эти два явления и служат причиной обнаружения границ между ледяными кристаллами при просвечивании.

Пользуясь этими методами, можно было обнаружить, что величина кристаллов в кусках льда, взятого из нижней прозрачной части речного льда из глубоких мест р. Вологды, или в пластинках искусственного созданного в фото-кюветах льда в поперечнике достигает нескольких кв. сантиметров. Этими же приемами можно было обнаружить общий характер ориентированности кристаллов льда. Так, можно было показать хорошо известный в литературе факт, что природный лед имеет столбчатый характер (1).

Для изучения ориентировки кристаллов и выявления других физических свойств льда нами был разработан метод фигур таяния, начало которого было положено Тиндалем, показавшим, что при просвечивании пластинки озерного льда в проекционном фонаре на экране видны так называемые «ледяные цветы» с осью симметрии шестого порядка. При изучении же речного и искусственного льда оказалось, что далеко не во всех случаях мы получаем фигуры таяния с осью симметрии шестого порядка. Во многих случаях мы получаем фигуры таяния овальной или

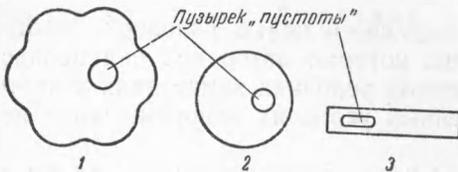


Рис. 1. Фигуры таяния льда: 1 — в форме «ледяного цветка» (вид в направлении оси шестого порядка), 2 — округлой формы (вид в том же направлении), 3 — вид фигуры таяния в поперечном направлении

округлой формы. При просвечивании в направлении, перпендикулярном к тому, при котором получаются «ледяные цветы» или фигуры таяния округлой формы, на экране мы имеем вытянутые прямоугольники с отношением сторон от 6 до 20 (рис. 1). При этом короткая сторона прямоугольника фигуры таяния в большинстве случаев будет перпендикулярна поверхности воды, на которой образуется лед, и будет

совпадать с направлением наихудшей теплопроводности, а длинная сторона прямоугольника фигуры таяния будет параллельна поверхности воды и будет совпадать с направлением наилучшей теплопроводности кристаллов льда.

Можно дать следующее объяснение такой ориентированности кристаллов льда, выросших на поверхности замораживаемой воды. Если образование кристаллов льда шло в условиях свободного роста, т. е. такого роста, когда свойства среды во всех направлениях, идущих от центра кристаллизации, физически одинаковы, тогда кристаллы льда имеют пластинчатый характер (например, снежинки, пластинки льда, образовавшиеся внутри переохлажденной воды, и т. д.). Это показывает, что скорость роста кристаллов льда в различных направлениях весьма различна. Известно, что нормаль к такой пластинке есть ось симметрии шестого порядка.

Представим себе открытую поверхность замораживаемой воды. Отвод тепла идет снизу вверх. Тонкий верхний слой воды переохлажден. Тогда в нем возникают отдельные, как угодно ориентированные центры кристаллизации. Ясно, что расти будут те центры, у которых грань базиса параллельна поверхности воды. При изучении речного льда можно было установить, что по преимуществу кристаллы льда ориентированы так, что их базис параллелен поверхности воды. Но в некоторых случаях нами было установлено в природном льде наличие двух взаимно перпендикулярных ориентировок, одна из которых та, о которой говорилось выше, и вторая — ей перпендикулярная. На полученных мною фотографиях видны только «ледяные цветы» и вытянутые прямоугольники. Последние расположены так, как если бы лед имел слоистое строение.

Отдельные большие куски льда, взятого из реки, нами были испытаны механически, а именно, ударив острым железным крюком, можно

было обнаружить одну из двух плоскостей раскола: параллельную поверхности воды или перпендикулярную ей.

Методы замораживания воды и водных растворов и типы кристаллизации льда. Обычный метод замораживания воды и водных растворов — это замораживание с открытой поверхности. При этом методе тепло, выделяемое при замораживании, отводится снизу вверх. Этот метод страдает существенными недостатками: давление и концентрация раствора внутри воды или раствора непрерывно повышаются, причем давление достигает величины, при которой оно обычно становится выше предела прочности материала, из которого сделан сосуд с замораживаемой жидкостью. Чтобы устранить этот недостаток, нами были использованы следующие два способа замораживания воды: а) способ бокового охлаждения и б) способ охлаждения сверху, при постоянном давлении подо льдом.

Способ бокового охлаждения состоит в том, что берется металлический сосуд (например, банка из тонкой жести), который сверху покрывается «шапкой» из непроводящего тепло материала (например, несколько слоев бумаги). Этим самым теплоотвод вверх прекращается и охлаждение производится только через боковую поверхность сосуда. Образование льда идет внутри по боковой поверхности. При этом давление внутри жидкости остается постоянным.

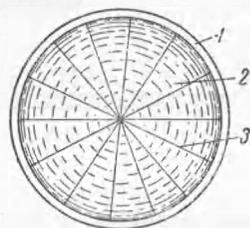


Рис. 2. 1 — сосуд, 2 — жидкость, 3 — кристаллы льда

В том случае, когда замораживание по методу бокового охлаждения производится в атмосфере сухого воздуха, т. е. с малым содержанием центров кристаллизации, описываемый нами метод дает возможность легко переохладить жидкость, содержащуюся в сосуде. Практически этот способ дает возможность получать переохлажденную воду в любых количествах. Легко удастся переохладить воду до температуры  $-5^{\circ}$ , после чего наступает внезапная кристаллизация с образованием пластинчатых кристаллов, идущих в цилиндрическом сосуде от периферии к оси цилиндра (рис. 2). В этом случае мы имеем дело с объемной кристаллизацией, происходящей за счет того запаса холода, который содержится в переохлажденной жидкости. Центры кристаллизации образуются на внутренней поверхности сосуда, т. е. там, где имеется резко выраженная неоднородность. Центры возникают в любых ориентировках, но расти, естественно, будут те, у которых направление наискорейшего роста или направление наилучшей теплопроводности идет от периферии к оси цилиндра. После того как объемная кристаллизация пройдет до конца, т. е. когда запас холода будет исчерпан, начнется иной тип кристаллизации, а именно, поверхностная кристаллизация с образованием толстого слоя льда на внутренней поверхности цилиндра с кристаллами льда, преимущественно направленными так, что базис гексагональной призмы параллелен поверхности цилиндра.

Второй способ замораживания, примененный нами, заключался в том, что сосуд с жидкостью имел боковой отвод, идущий от дна сосуда. Весь сосуд с отводом помещался в золу; охлаждение производилось с поверхности жидкости. Постоянство давления внутри сосуда поддерживалось тем, что излишек жидкости вытекал через боковой отвод, температура верхней части которого поддерживалась выше нуля (рис. 3).

В ы м о р а ж и в а н и е. Под «вымораживанием» надо понимать процесс испарения воды или жидкости, происходящий при температурах, равных или ниже точки кристаллизации. Естественно, что испарение при этом может идти как с поверхности твердой фазы, так и с поверхности жидкой. Энергетически же вымораживание может происходить или за счет скрытой теплоты кристаллизации, или за счет энергии

внешнего источника, или за счет охлаждения образовавшейся твердой фазы. Будем различать два типа вымораживания: первый тип, когда испарение идет в процессе кристаллизации, т. е. когда температура кристаллизуемой жидкости равна температуре кристаллизации, и второй тип вымораживания, когда испарение идет с поверхности твердой фазы, после того как вся жидкость закристаллизовалась\*. С целью

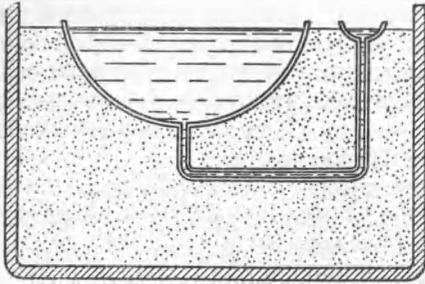


Рис. 3

определения величины вымораживания первого типа, происходящего за счет скрытой теплоты, мы подвергали взвешиванию замораживаемую воду, налитую в открытый сосуд (в нашем случае фото-кувета, изготовленная из пластмассы, плохо проводящей тепло). Предварительно вода охлаждалась до нуля. Измерялась масса воды как функция времени. Опыт проводился при различных температурах или до полного замораживания или до частичной кристаллизации воды (чтобы избежать влияния охлаждения снизу и сбоку). Кривая на рис. 4 дает характер изменения массы воды со временем. Общая потеря в массе при этом составляет 2—3%, на что расходуется 20—25% скрытой теплоты кристаллизации. Вначале вымораживания процесс идет довольно быстро, замедляясь к концу и переходя постепенно во второй тип вымораживания.

Естественно, что понимаемый в нашем смысле слова процесс вымораживания идет только в том случае, если имеется открытая поверхность вымораживаемой жидкости и если окружающее пространство не насыщено водяными парами.

Замораживание как источник энергии. При образовании льда, как известно, 1 г воды выделяет 80 кал., т. е. процесс замораживания воды может быть рассматриваем как источник энергии. В природе, при наличии водоемов с большими поверхностями, роль этой энергии может быть весьма и весьма значительной. Впервые этот вид энергии в природе был учтен акад. В. В. Шулейкиным при расчете теплового режима Карского моря (2). Но тот же вид энергии остается неучтенным при объяснении замечательного явления, имеющего место над оз. Байкал, на поверхности которого зимой температура значительно выше, нежели на суше в местах, удаленных от берега озера (3, 4).

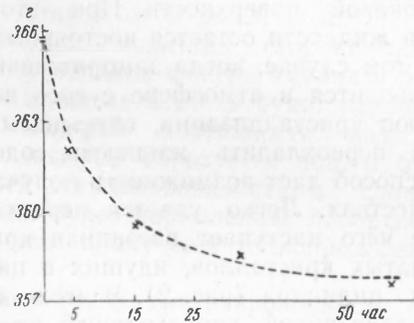


Рис. 4

Поступило  
2 XII 1949

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Б. П. Вейнберг, Лед, М.—Л., 1940, стр. 405. <sup>2</sup> В. В. Шулейкин, Физика моря, М.—Л., 1941, стр. 323. <sup>3</sup> А. В. Вознесенский в сборн. Лоции и физико-географический очерк озера Байкал, 1908. <sup>4</sup> Л. С. Берг, Основы климатологии, Л., 1938, стр. 176.

\* В физике этот второй тип вымораживания носит название сублимации.