

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДОЕМОВ И ВОДОТОКОВ

Голубев В.Н.

МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия

Зарождение льда на водоемах, как и другие проявления конжеляционного льдообразования (зарождение льдов в промерзающих грунтах и атмосферных льдов), происходят обычно в условиях постепенного охлаждения поверхности воды и пограничного слоя вмещающей среды, причем высокая теплоемкость воды определяет термическую инерционность ее по сравнению со средой.

Переохлаждение поверхностного слоя воды перед появлением ледяного покрова обычно не превышает десятых долей градуса, достигая в отдельных случаях $-1,5^{\circ}$ – -5°C . При таком малом переохлаждении воды формирование ледяного покрова возможно лишь в результате гетерогенного зарождения льда на механических примесях, находящихся в пределах тонкого слоя переохлаждения и характеризующихся высокой льдообразующей активностью, в том числе вследствие разрастания ледяных кристаллов, поступающих извне в поверхностный слой воды, имеющей температуру близкую к точке фазового перехода. Источником механических примесей может служить твердый атмосферный аэрозоль, основными составляющими которого являются минеральные частицы, которые поступают в атмосферу в результате эоловой или вулканической деятельности, а также частицы органического происхождения. Факторами гетерогенного льдообразования являются размеры, строение, химический и минеральный состав частицы и эродированность её поверхности. При переохлаждении $\Delta T > 0,1^{\circ}\text{C}$ разрастание возникших кристаллов происходит за счет тонких (10^{-3} – 10^{-2} см) дендритных выростов и на поверхности водоема формируется звездообразная система тонких (10^{-3} – 10^{-2} см) лучевидных кристаллов, имеющих обычно дефектное строение.

В прибрежной зоне вода постоянно контактирует с намного более крупными почвенно-грунтовыми частицами и, соответственно, более активными в зарождении льда, здесь также в большем количестве присутствуют растительные остатки, льдообразующая активность которых в целом выше, чем минеральных частиц. Все это предполагает зарождение ледяных кристаллов при меньшем переохлаждении воды и первоочередное формирование льда именно в прибрежной зоне. В случае выпадения снега структура поверхностного слоя ледяного покрова существенно меняется. При снегопаде средней интенсивности,

$0,5 \div 5 \text{ мм} \cdot \text{час}^{-1}$, охлаждение поверхностного слоя воды за счет таяния снежинок происходит со скоростью $10^{-3} \div 10^{-2} \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$, а по достижении температуры фазового перехода практически сразу начинается кристаллизация.

Скорость роста льда можно охарактеризовать теоретическим выражением, $v=0,053 \cdot (\Delta T)^{1,75} \text{ см/с}$. В естественных условиях нарастание ледяного покрова протекает при нестационарном, постоянно меняющемся термическом режиме. Сезонный ход температуры воздуха, изменение толщины ледяного покрова и отложение снега на его поверхности предполагают закономерные изменения термического режима в нарастающем ледяном покрове, а синоптические колебания могут вызывать хотя и кратковременные, но значительные градиенты температуры в ледяном покрове. Все это служит причиной постепенных или резких изменений переохлаждения воды у фронта кристаллизации и ведет к изменению механизма и скорости роста кристаллов. Скорость роста ледяного покрова можно охарактеризовать, исходя из представлений о процессах тепло- и массообмена на границе раздела вода – лёд, как функцию градиента температуры в перекрывающем снежно-ледяном покрове, $V=7,7 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{grad} T)_л$ и записать для натуральных условий соотношение между градиентом температуры в снежно-ледяном покрове $(\text{grad} T)_л$ и переохлаждением воды у фронта кристаллизации $\Delta T_в$: $\Delta T_в=2,2 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{grad} T)_л^{0,57}$.

Анизотропия теплопроводности льда предполагает, что в случае плоского фронта кристаллизации переохлаждение перед *C*-кристаллами (ось *C* расположена вертикально) больше чем перед *A*-кристаллами (ось *C* расположена горизонтально) и, соответственно, более быстрый рост *C*-кристаллов. Однако вследствие суперпозиции анизотропии теплопроводности с анизотропией скорости роста *C*- и *A*-кристаллы растут с одинаковой скоростью лишь при условии, что перед *C*-кристаллами переохлаждение больше, чем перед *A*-кристаллами на 3–10%. Поэтому выклинивание–разрастание кристаллов в процессе роста ледяного покрова определяется не только величиной переохлаждения, но и соотношением переохлаждения перед соседними кристаллами.

Механизм выклинивания кристаллов заключается в формировании неплоского фронта кристаллизации и разрастании боковых поверхностей благоприятно ориентированных кристаллов, выдвинувшихся относительно соседних, иначе ориентированных.

Представления об основных закономерностях формирования структуры ледяного покрова и имеющиеся сведения о зависимости механических свойств льда от размера слагающих зерен и ориентации их главных (С) осей могут служить основанием прогноза не только строения, но также прочности и несущей способности ледяного покрова.