

ком льда, то в ее теле сразу начнется процесс кристаллизации, и она погибнет. Однако это происходит крайне редко, так как придонные рыбы никогда не соприкасаются со льдом.

Внеклеточная жидкость у животных и растений замерзает раньше, чем внутриклеточная. При медленном замерзании внеклеточного солевого раствора вода кристаллизуется, а соли накапливаются между кристаллами, повышая осмотическую концентрацию оставшегося внеклеточного раствора. В результате внеклеточный концентрированный раствор отсасывает воду из клеток, они обезвоживаются, и температура замерзания внутриклеточного раствора понижается.

Рыбы, обитающие в холодных приполярных водах (нототениевые, камбала и др.), обладают уникальной способностью не замерзать, находясь в переохлажденном состоянии, до температуры $-2,2$ °С. Для сравнения: большинство рыб тропических и умеренных широт в присутствии льда замерзают при охлаждении до $-0,8$ °С. У многих читателей сравнение этих двух чисел наверняка вызовет улыбку. Всего-то 1,4 градуса?! Да, именно эти полтора градуса и помогают антарктическим рыбам выжить – ведь, например, в проливе Мак-Мердо (самой близкой к Южному полюсу части мирового океана) средняя годовая температура составляет $-1,87$ °С, варьируя в пределах от $-1,4$ до $-2,15$ °С. Но механизм, посредством которого нототения избегает замерзания, плавающая среди льдов, отличен от того, который используют насекомые.

Прежде чем познакомиться с секретом приполярных рыб, посмотрим, от чего зависит образование кристаллов льда. Установлено, что температура замерзания большинства растворов связана с количеством растворенных частиц, а не с их природой. Присутствие растворенных частиц, очевидно, уменьшает вероятность образования кристаллического зародыша, так как при этом уменьшается число столкновений молекул воды между собой. Таков, например, механизм действия хлористого натрия, используемого до сих пор во многих городах для борьбы с гололедом. Аналогично, по-видимому, действует и глицерин, препятствующий замерзанию насекомых в холодное время года. Но возможен и другой, более тонкий механизм действия антифризов, не требующий большой их концентрации. Оказалось, что некоторые полипептиды и гликопротеины, молекулы которых состоят из множества повторяющихся единиц, а молекулярная масса составляет от 3 до 40 тысяч дальтон, способны уже в миллимолярных концентрациях значительно понижать температуру замерзания. И если сравнить эти белковые антифризы с NaCl, то окажется, что первые в 300–500 раз более эффективны. Каков же механизм действия белковых антифризов?

Молекулы воды в кристаллах льда образуют гексагональную решетку с атомами кислорода в углах шестиугольников. Поэтому в идеальных условиях кристаллы льда представляют собой шестиугольные призмы. Ученые установили, что многочисленные полярные группы в молекуле белкового антифриза, способные образовывать водородные связи с молекулами воды,

находятся друг от друга на том же расстоянии (порядка 4,5 ангстрем), что и молекулы воды в кристаллах льда. И как следствие, длинные молекулы биологических антифризов, связываясь с торцевой быстрорастущей гранью, могут значительно тормозить рост кристалла. На долю белковых антифризов приходится около 3,5% массы всех жидкостей тела полярных рыб. Эти антифризы, действуя сообща, и понижают температуру замерзания приблизительно на 1,2 °С. Еще на один градус понижают ее содержащиеся в жидкостях антарктических рыб различные ионы и молекулы (главным образом, NaCl). Концентрация биологических антифризов в жидкостях тепловодных рыб ничтожна.

Однако белки могут играть роль не только биологических антифризов, но и совсем другую – облегчать кристаллизацию льда в живых организмах. Таково, например, значение некоторых видов белков, обнаруженных на внешней мембране бактерий *Erwinia herbicola*, *Pseudomonas syringae* и др. Эти бактерии, которые обычно можно найти на поверхностях растений в Европе, Азии и Северной Америке, относят к разряду вредных, связывая с ними низкую сопротивляемость растений к холоду. Известно, что даже очень чувствительные к холоду растения могут переносить понижение температуры до нескольких градусов ниже 0 °С из-за переохлаждения внутриклеточной воды. Холодовые повреждения таких растений в открытой местности случаются от -2 до -5 °С и являются следствием роста кристаллов льда из переохлажденной внутриклеточной воды. Однако если выращивать те же растения в стерильных условиях, исключающих попадание бактерий на их поверхности, то даже при охлаждении до -8 °С кристаллизации внутриклеточной воды (а значит, и повреждения) не происходит. Обработка антибиотиками (стрептомицин, тетрациклин), убивая бактерии, также помогает значительно увеличить морозостойкость растений. Ученые установили, что белок, находящийся в мембране этих бактерий, обладает уникальным свойством связывать молекулы воды, собирая из них конфигурацию, аналогичную той, которая имеется в кристаллах льда. В результате на мембране бактерий появляются микроскопические кристаллики, служащие зародышами для кристаллизации всей внутриклеточной воды.

Оказывается, способностью облегчать кристаллизацию льда обладают лишь очень немногие виды бактерий. Так, из 42 видов бактерий, собранных с листьев боярышника, этими свойствами обладал только один вид – *Pseudomonas syringae* van Hall. Да и не все бактерии этого вида содержат в своей мембране уникальный белок – кристаллизатор воды. Считается, что бактерии, служащие зародышами для кристаллизации льда, могут играть существенную роль в определении климата местности, определяя температуру кристаллизации атмосферной влаги.