

# Притча о донном льде

Это интересное само по себе физическое явление было обнаружено — точнее, отмечено, обнародовано — относительно недавно. Очень может быть, что это сделали в середине прошлого века золотоискатели на Аляске, на знаменитом Клондайке, черпая песок для промывки со дна быстрых ручьёв, которые продолжали течь и при наступивших сильных морозах. В одном из рассказов Джека Лондона о золотоискательской жизни персонажи ведут жестокий спор насчет донного льда.

**З**амерзание «нормальных» водоёмов — равнинных рек, озёр, морей — начинается сверху. А лёд легче воды, он в ней не тонет. Ледяная корка, к тому же покрытая ещё более легким снегом, образует слой тепловой изоляции, препятствующий дальнейшему охлаждению и, соответственно, замерзанию водоёмов.

Тем не менее, весьма очевидным подтверждением возможности замерзания водоёмов снизу служат кусочки земли и камешки, которые можно заметить в толще речного льда. Автор неоднократно отмечал такие включения — камешки размером до десяти сантиметров — во время зимних походов по порожистым, популярным для спортивного сплава притокам Ангары — Иркуту и Китою, видел летом в сохранившейся с зимы наледи в верховьях реки Куркула на Байкальском хребте. Столь подробно говорится здесь о донном льде не просто так: о нём думали и его опасались проектировщики Иркутской ГЭС.

## Если бы лёд тонул, всё на Земле было бы наоборот

**В**от цитата из книги академика Г.И. Галазия «Байкал в вопросах и ответах» (М., «Мысль», 1988, 239 с.): «Что было бы, если бы лёд не плавал на воде, а тонул? Если бы лёд тонул, то все водоёмы умеренных и высоких широт на Земле оказались бы заполненными им от поверхности до самого дна. Солнце не смогло бы растопить эту массу, вытравив бы лишь тонкий поверхностный слой. На планете царил бы вечный холод, и она стала бы необитаемой».

Как инженер-теплотехник и гидравлик по образованию и эколог от энергетики по роду многолетних исследований (в том числе — по выбору решений для газопроводов в мерзлоте), я не могу согласиться со столь крайними в своей категоричности оценками: «вечный холод», «необитаемая планета». Так, протаивание мерзлой почвы происходит при переносе тепла сверху вниз в основном за счёт теплопроводности, а не конвекции. Пробуждение рек весной затруднено находящимся сверху, плавающим на воде льдом. При «тяжёлом льде» на дне достаточно глубоких озёр и морей, возможно, лежал бы слой вечного льда, но это неочевидно, поскольку немалый поток тепла идет из глубинных недр планеты к её поверхности.

В океанах существуют мощные тёплые и холодные течения, определяемые не температурными, а более сложными и комплексными общепланетарными процессами и космическим взаимодействием — надо полагать, тяжёлый лёд, повливая на кинетику этих течений, ликвидировать их не смог бы. Ну, а насчёт необитаемости планеты... Есть весьма широкий пояс по обе стороны экватора, где снег и лёд можно увидеть лишь на высоких горах и где понятия «зима» и «лето» весьма относительны.

Переважив, осмыслив информацию, подчерпнутую из популярной и специальной литературы, на фоне услышанного от геологов, проектировщиков, строителей и лично увиденного, я считаю целесообразным дать здесь сведения, которые могут оказаться полезными или хотя бы интересными читателям.

## Замерзание стоячей воды — это легко и просто

**М**еханизм, процесс образования ледяного покрова на быстро текущих реках принципиально отличается от замерзания стоячей воды в озёрах (лёд на лужах, где с удовольствием проваливаются ребятишки — это то же, что и на озерах). В стоячей воде сначала происходит снижение температуры всего объёма: вода поверхностного слоя охлаждается при теплообмене с воздухом, её плотность растёт, она опускается, на её место поднимается более тёплая вода нижних горизонтов. Когда температура всей толщи снижается до плюс четырёх градусов, при которой чистая вода имеет максимальную плотность, то процесс перемешивания кончается, охлаждаемая сверху вода перестаёт опускаться, её температура снижается до нуля, а потом на самой поверхности появляется корочка льда, которая нарастает.

Естественно, озера начинают покрываться льдом от берегов: там толщина слоя воды меньше, поэтому она быстрее охлаждается до плюс четырёх (теплообмен по горизонтали с глубокой частью водоёма существенно

меньше, чем по вертикали), к тому же идет охлаждение со стороны суши снизу. Слой льда по мере его нарастания и при наличии снежного покрова уменьшает интенсивность охлаждения водной массы (тепловая изоляция), но при отрицательном тепловом балансе (теплообмен конвекцией и радиацией) толщина льда постепенно нарастает от нижней поверхности его слоя.

## Три механизма замерзания воды текущей

**У** воды текущей существует три механизма льдообразования, три вида льда. Обычный, первичный, который все видели — это лёд поверхностный, образующийся при тихой погоде и практическом отсутствии течения, когда перемешивание воды не разрывает образующуюся на поверхности плёнку льда. В плёнку стягиваются, срываются первичные ледяные кристаллы. В зависимости от условий эти кристаллы бывают в форме шестилучевых звезд (поперечник — от миллиметра до полуметра), перистые, закрученные, игольчатые, чешуйчатые. Слой поверхностного льда прозрачен, в нём могут быть мелкие плоские пузырьки воздуха, пойманного кристаллами.

На быстрых реках, на порогах и перекатах, а при сильном ветре — и на равнинных реках и озёрах образуется внутриводный лёд («шорох») — это кристаллы различной формы, в которые превращаются частицы воды, переохлаждённой на поверхности, но не успевшей там замёрзнуть. В толщу перемешиваемой воды могут быть затянуты и «зародыши» поверхностного льда. Размеры кристалликов — от долей миллиметра до нескольких миллиметров, в пределе — до 2—3 сантиметров.

Третий вид льда — донный. Он образуется при омывании переохлаждённой на поверхности водой дна потока, выступающих там камней и находящихся в воде предметов (днища судов, сваи, водоросли, рыбачьи сети), которые служат центрами льдообразования. Обычная форма — кристаллические пластины размером от долей миллиметра до десяти сантиметров. На бурных участках течением на дно заносится шорох, застревающий между пластинами донного льда. При потеплении и после образования сплошного ледяного покрова пластины всплывают, усиливая, утолщая этот покров.

Кристаллы внутриводного льда можно обнаружить в ведрах воды, зачерпнутой в проруби при сильном морозе.

## О донном льде — по науке

**В** «Гидрологическом словаре» А.И. Чеботарева (Л.: Гидрометеоиздат, 1978, 308 с.) дается определение внутриводного (глубинного) льда: «Различные ледяные кристаллы... или их скопления в толще воды в виде губчатой непрозрачной массы. Образуется при охлаждении воды ниже точки замерзания (переохлаждении) и интенсивном её перемешивании при открытой водной поверхности... Скопления... закрепляются на дне (донный лёд), на находящихся в воде предметах, забивают отверстия гидротехнических сооружений...».

Донный лёд характерен для быстрого течения потока по галечно-каменистому дну, у окончания плёса и начала переката. Лёд нарастает ночью и всплывает днём. Его образование усиливается, а всплытие замедляется при ветреной погоде, при повышенном осеннем стоке.

В местах постоянных водоворотов, на порогах рек, где переохлаждённая вода интенсивно втягивается на дно, могут образовываться растущие столбы донного льда («пята»), достигающие поверхности, и тогда выступающая вершина становится центром образования, нарастания поверхностного льда.

Кусочки льда, плотность которого лишь немного меньше плотности воды: 916,8 кг/куб. м против 999,9 кг/куб. м, — в быстром потоке всплывают не сразу, и по руслу идёт смесь воды с частичками всплывающего донного и притоленного поверхностного льда, комочков снега — по реке идет «шуга». После ледостава образование донного льда, естественно, в общем продолжается, способствуя сужению рабочего сечения потока и его полному перемерзанию.

Всплывающие куски донного льда (их размер может достигать одного-трёх метров, они, как кессоны, выносят довольно большие кам-



ни, оторванные от дна) вместе со скоплениями шуги могут временно перекрыть всё сечение потока под слоем поверхностного льда. Следствием этой пробки, ледяной плотины («зажора») будет выход воды, поступающей по реке сверху, на её лёд, широкое разливание, водно-ледяная каша, замерзающая буграми.

Замерзшие реки используются в Сибири в качестве дорог, зачастую единственных, для переброски грузов на север и в горы по земле. Так вот, бугристые наледи, которые к тому же нередко проваливаются, пробиваемые потоком снизу — это очень неприятно и опасно. Туристы-зимники тоже эти наледи проклинаят. Однажды в походе по Восточному Саяну, спускаясь по льду речки, мы оказались в узком ущелье. Постепенно крутизна сильно увеличилась, голая бугристая наледи не позволила спуститься на лыжах, «кошки» на обуви скользили. Мы легли на живот и, двигаясь вперёд ногами, тормозили концами лыжных палок в вытянутых над головой руках. Потом и это стало невозможно, мы могли как минимум поломать руки-ноги о камни. Не готовые к такой ситуации, мы с адским трудом и риском полезли вверх по обледенелой скальной стенке.

Но туризмом никто не заставляет заниматься, это дело добровольное. А вот по одной из улиц поселка Култук, что на самой южной оконечности Байкала, течёт малюсенькая речка Тягунчиха — как арык по огородам. И вот как-то к весне по просьбе знакомого фермера мы провели там рекогносцировочное обследование на предмет сооружения микрогидроузла — чтобы сделать пруд для гусей-уток, поставить ГЭС хотя бы на несколько киловатт и — вот это главное! — защитить десятки домов на этой улице от наледи. Эта наледи, прямо как какая-то раковая опухоль, к весне буквально пожирала улицу — с дорожкой, с фундаментами строений, с огородами — и ставила медленнее, не позволяя приступить к садовому-огородным работам. Не знаю, реализовался ли наш проект: помнится, замеры показали, что для гарантированной мощности в пару киловатт надо строить плотину в несколько метров с широкой дамбой — фермер такое бы не потянул, а нижние жители — они каждый сам по себе.

## Зимнее половодье — это плохо, а ГЭС — это хорошо!

**П**еремерзание мощного потока возникает прежде всего там, где уменьшается крутизна русла с расширением долины и, соответственно, одновременным уменьшением глубины и скорости течения. Когда гидравлическое сопротивление «ледяной диафрагмы» достигает величины динамического напора потока воды, поступающего сверху, и поток уже не может протиснуться через свободное сечение, вода выходит на лёд, движется по нему слоем в виде водно-снежно-ледяной каши.

Образование внутриводного льда характерно в частности для «энергетической» реки Ангары: мощный поток с повышенным уклоном, чередование сужений и расширений русла, незамерзающий участок пульсирующей протяжённости на выходе из Байкала, где река, переваливая через порог, подтягивает воду из глубины озера с температурой заметно выше нуля.

Иркутские летописи, изданные записки именитых жителей города свидетельствуют: зимние наводнения в декабре-январе, на Рождество и Крещение, «радовали» столицу Восточной Сибири пусть не ежегодно, но достаточно регулярно. На старых фотогра-

фиях и рисунках есть очень впечатляющие картинки: телеги, экипажи и пешеходы на улицах, залитых парящей на морозе водой, снежно-водяной кашей. В 1953 году в Иркутске произошло последнее зимнее «половодье»: после сильного мороза наступила оттепель, Ангара оживилась, взломала лёд в зажоре-суженье над Иркутском и вышла из берегов. Подъём воды в Ангаре при таких зимних наводнениях достигает в некоторых местах 10 метров, а у Лены — 32 (это почти высота Иркутской ГЭС).

Вредное воздействие водохранилищ и плотин ГЭС на природную среду, в том числе отторжение ценной территории — притча во языцех. О позитивных аспектах здесь говорят мало или вообще не говорят. В частности, в СМИ мне ни разу не попадалось «спасибо» каскаду ГЭС за полную ликвидацию опасности, риска зимних наводнений для городов на Ангаре. Сначала сказывается действие Иркутского водохранилища, а там начинается Братское водохранилище, затем Усть-Илимское и сразу Богучанское.

## Гидростроители не боялись, но опасались

**В** «Прикладной гидрологии» Р.К. Линдслея, М.А. Колера и Д.Л.Х. Паулюса (Л.: Гидрометеоиздат, 1962, 759 с.) говорится о возможных затруднениях в эксплуатации ГЭС при наличии внутриводного льда, который «прочно примерзает к любым металлическим предметам, выступающим над водной поверхностью и охлаждённым ниже точки замерзания».

Накопление льда в рабочем колесе турбин может привести к остановке ГЭС. Профилактика — делать водозаборные отверстия заведомо ниже поверхности воды. Ликвидация — обогрев решеток или рабочих колес турбин электрическим током при расходе электроэнергии 4—8 кВт на один кубометр воды в секунду. Если считать сток Ангары в 2000 куб. м/с, то на обогрев пойдет (если что...) 8—16 МВт. При расчётной мощности Иркутской ГЭС в 660 МВт это относительно немного, но по абсолютной величине немало: этого, например, с избытком хватило бы для всех населённых пунктов побережья Байкала, не присоединённых к энергосистеме (проблема тут — отсутствие не энергии, а ЛЭП).

Так вот, Иркутское водохранилище, широкое и глубокое, существенно уменьшило скорость воды в верхнем бьефе, перед турбинами. На стремительной реке появился участок многокилометровой длины, где поступающий сверху внутриводный лёд успевает полностью всплыть, а свой, местный, не образуется. Тем самым проблема защиты рабочих колёс от обмерзания снялась автоматически. Поскольку водохранилище над плотинами — это непреклонный атрибут гидроузла для создания требуемого напора гидротурбин и сглаживания неравномерности стока, то проблема защиты рабочих каналов от обледенения отсутствует (или, во всяком случае, не является трудной преодолимой) и на других северных ГЭС. Помнится, Владимир Медведев, директор одной из наших самых северных гидроэлектростанций — построенной на многолетней («вечной») мерзлоте Вилюйской ГЭС (до того он строил Иркутскую ГЭС), сказал, что обмерзание рабочих каналов у них не наблюдалось. Но однажды первый турбоагрегат пришлось остановить по причине оригинальной некуда: в подпятник рабочего колеса... набились налимы.

Александр Кошелев, ИСЭМ СО РАН  
Фото В. Короткоручко