

О донном льде¹⁾.

В. Я. Альтберг.

Вопрос о донном льде имеет длинную, но странную историю. Более ста лет, как явление это привлекало внимание многих, ввиду той роли, какую оно играет в северных странах, и ввиду безуспешности попыток удовлетворительно объяснить своеобразную особенность его, заключающуюся в более раннем замерзании воды (на дне), более удаленной от источника охлаждения и ближе всего расположенной к источнику нагревания (почвенное тепло). О природе этого «парадоксального» явления уже с давних пор велись бесплодные споры, незакончившиеся, как это ни странно, даже до настоящего времени²⁾. Удивительнее всего то, что, несмотря на обширную литературу³⁾, свидетельствующую не только о научном интересе к этому явлению, но также и о большом практическом значении его вообще, в особенности в гидротехнике при использовании водяной энергии страны, вопрос о его природе и самой причине образования не оказался сдвинутым с мертвой точки, на какой он пребывал в течение многих десятилетий. Причина этого в том, что за отсутствием количественных и опытных данных вопрос обсуждался обыкновенно в плоскости одних лишь предположений и необоснованных догадок. Ввиду, однако, накопившегося за последнее время обильного материала наблюдений, своеевременной и назревшей оказалась потребность в коренном пересмотре всего вопроса, предпринятым мною после того, как петроградское общественное самоуправление обратилось в 1915 г.⁴⁾ в Главную Физическую Обсерваторию за выяснением природы этого явления, предоставив ей с этой целью определенные средства.

¹⁾ Доклад, прочитанный на съезде по водопроводному делу в Москве в октябре 1922 года.

²⁾ Статья J. Aitken'a (Journal of the Scott. Meteor. Soc. v. XVIII, № 35. 1917.), между прочим, дает повод к критике (см. ниже) и отбрасывает нас назад, к тридцатым годам прошлого столетия, когда Араго и Гей-Люссак вели спор о самой возможности образования льда на дне.

³⁾ Список одних заглавий статей, заметок и отдельных монографий по этому вопросу занял бы десяток страниц.

⁴⁾ После памятного петроградцам случая закупорки донным льдом приемных труб водопровода, лишившей весь город воды 14 декабря 1914 г.

Не считая возможным останавливаться здесь¹⁾ на истории различных толкований природы явления и беспочвенных споров по этому поводу, я предпочту прямо перейти к фактам и опытам, вскрывающим истинную сущность явления, охарактеризовав лишь в самых общих чертах положение вопроса, каким оно было в то время.

До последнего времени у нас преобладал (за границей же преобладает еще по сие время²⁾), взгляд, приписывающий необычное явление льда на дне охлаждению последнего, вследствие предполагаемого излучения тепла сквозь воду. Эта идея, развитая Фаркгарсоном (Farkgarson, 1844), независимо от него Ассманом (Assmann, 1888), использованная затем Барнесом (H. Barnes³⁾), была признана известным физиком Кобленцом (Coblenz⁴⁾) «наиболее удачной», дающей «наивероятнейшее» объяснение рассматриваемого явления и уже издавна клалась инженерами неизменно в основу при конструировании ими тех частей гидротехнических установок и водоприемников, работе которых препятствовал образующийся донный лед. Однако практика американских водопроводов обнаружила безусловно отрицательный результат такого рода конструкций, тем самым подвергнув сомнению правильность исходной идеи.

Мною было уже отмечено⁵⁾, что идея эта, основанная на произвольном допущении необыкновенной будто бы прозрачности воды для некоторых категорий инфракрасных волн, в корне неверна и противоречит фактическим данным опыта⁶⁾, вследствие чего объяснение донного льда при помощи теплового излучения дна могло быть названо «удачным и наивероятнейшим» лишь по недоразумению.

Факты и результаты лабораторных опытов и наблюдений в природе.

Побудительным толчком к выяснению природы донного льда послужил случай экстраординарного замерзания Невы не сверху, как обыкновенно бывает, но снизу (со дна), имевший место 14 декабря 1914 г., когда весь Петроград оказался лишенным воды вследствие

¹⁾ Об этом изложено мною в другом месте (Метеорологический Вестник, 1920, Известия Рос. Гидролог. Института т. 1, 1921).

²⁾ Судя по обзору о современном положении вопроса, данном J. Smellie и A. Watt, Journ. of the Scott. Meteor. Soc. v XVII, № 34. 1917.

³⁾ H. Vagles, Anchor-Ice Formation from the Standpoint of the Radiation Theory, New-York 1906.

⁴⁾ W. Coblenz, Investigations of Infra-Red Spectra, Carnegie Institution of Washington Poubl. № 97 p. 147. 1908.

⁵⁾ Известия Главной Физич. Собсверват. т. 3. 1921.

⁶⁾ По исследованиям Paschen'a, Rubens'a, Aschkinass'a, К. П. Яковлева и др. вода в инфракрасной части спектра такой прозрачностью не обладает, наоборот, именно в области, соответствующей радиации холодного тела (дно реки), она чрезвычайно сильно абсорбирует, поглощая всю энергию уже в тончайших слоях воды, измеряемых малыми долями м.м.

обмерзания концов водоприемных труб (в форме раstrубов $d=2$ метра с железными решетками), заложенных посреди Невы на дне, на глубине 20 м. По свидетельству водолазов, дно реки и все находившиеся там части водопроводного оборудования оказались покрытыми мощным слоем рыхлого льда в $3/4$ метра толщины. Аналогичные случаи неоднократно повторялись в большем или меньшем масштабе, помимо Петрограда, также и в целом ряде других городов России и Америки (Варшава, Нью-Йорк и др.).

В январе 1917 г. почти повсеместно в Англии наблюдалось образование донного льда, повлекшее за собою приостановку водоснабжения в целом ряде городов и округов.

Однако гораздо более частые осложнения этого рода испытывают гидротехнические установки (силовые станции), в особенности в Канаде, которым ежегодно приходится бороться с вредными проявлениями такого льда. Грандиозные образования донного льда, вызывающие иногда изменения даже скалистого рельефа речных русел, происходят на больших реках Сибири, в особенности на реке Ангаре.

Выяснение условий образования такого льда начато было в лабораторной обстановке в Главной Физической Обсерватории, где вскоре удалось искусственно воспроизвести это явление и выяснить главные факторы, его вызывающие. Особенное внимание было обращено прежде всего на термические условия с применением чувствительных термометров (с точностью до $0^{\circ},002$). Оказалось, что вода, охлаждаемая в комнате при помощи охладительных смесей, при условии непрерывного перемешивания, легко может быть переохлаждена на несколько градусов ниже нуля, охлаждаемая же на дворе путем соприкосновения перемешиваемой воды с морозным воздухом, при условии обеспеченного заноса мельчайших кристалликов из атмосферы, никогда не может быть переохлаждена столь же сильно, как в первом случае, слабое же переохлаждение (измеряемое малыми долями градуса) можно было констатировать во всех случаях. По достижении температуры примерно $-0^{\circ},1$ в воде появлялись обыкновенно очень мелкие и тонкие пластинки (чешуйки) в форме кружечков в 1—2 мм. в диаметре, которые постепенно увеличивались в размере и в числе. После этого температура воды постепенно и медленно повышалась, не достигая, однако, в точности 0° , от которого она отличалась на 2—3 тысячных доли градуса. При таком ничтожно-слабом переохлаждении вода (перемешиваемая на морозе) могла оставаться в течение многих часов, несмотря на непрерывные выделения чешуйчатого льда внутри воды и на дне сосуда. Кристаллизация, следовательно, происходит при непрерывном наличии переохлаждения, хотя бы и ничтожно слабого. Строение ледяных пластинок (чешуек), образованных внутри воды и на поверхности дна сосуда, оказалось тождественным — вполне круглые, совершенно прозрачные пластинки с зеркальными параллельными поверхностями (рис. 1).

Попутно определялась общая теплопотеря воды, которая оказалась довольно значительной: обыкновенно она превышала 1 гр.-кал. в минуту с поверхности 1 см.² (при морозе, превышавшем 6° и наличии ветра).

По выяснении условий образования донного льда в лабораторной обстановке организованы были впервые с достаточной точностью и обстоятельностью наблюдения в естественных условиях на реке Неве в 1916/17 и 1920/21 гг.¹⁾ с целью выяснения температурных условий в реке в период захолаживания вообще и в особенности во время образования донного льда. С этой целью привлечен был штат наблюдателей Главной Физической Обсерватории, производивших наблюдения под моим руководством.

Применены были следующие приборы:

1) Ртутные термометры высшей чувствительности (разделенные на 0°,01) в специальных оправах с термической инерцией.

2) Специально выпи-
санный из Лондона элек-
трический термограф Кал-
лендара (Callendar) (точ-
ность измерения 0°,02).

3) Особо сконструиро-
ванный прибор, при по-
мощи которого возможно
было производить вполне надежные измерения температуры воды
непосредственно в реке в любое время дня и ночи, с точностью
до 0°,002.

¹⁾ Наблюдения 1920—1921 г.г. произведены были при ближайшем и непосредственном содействии Российского Гидрологического Института.

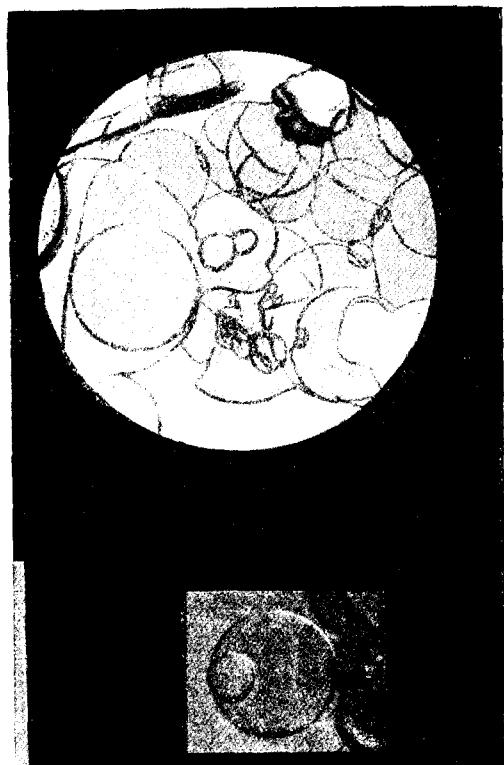


Рис. 1.

Рис. 2 представляет схематический разрез прибора.

T—чувствительный термометр, *M*—микроскоп, *P*—призма полного внутреннего отражения, *L*—электрическая лампочка, *K*—водонепроницаемая оболочка.

Определение поправок всех приборов и самые измерения в реке производились со всеми необходимыми и достаточными предосторожностями.

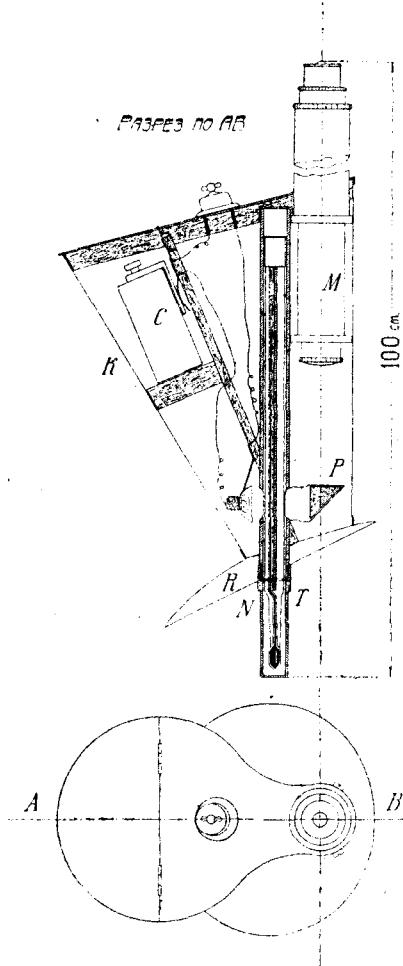


Рис. 2.

В нашем распоряжении имелся пароход и штат водолазов. Приемник термографа был заложен на глубине 12 метров, так что прибор давал непрерывную запись температуры придонного слоя воды. При помощи термометров производились ежечасные наблюдения (днем и ночью) в различных точках речного профиля, как поперечного, так и продольного. Из полученного таким образом весьма обширного материала наблюдений здесь может быть приведена лишь сводка общих выводов.

В период, когда температура воды на много градусов выше 0° , распределение ее по профилю лишь в самом грубом приближении можно считать равномерным. Более точный, систематический промер обнаружил довольно пеструю картину «микротермической» структуры профиля. В виду недостаточно основательного перемешивания всех слоев в реке, можно было наблюдать обыкновенно легкие уклоны температуры в ту и другую сторону от среднего ее значения, доходящие иногда до $0^{\circ},3$. Уклоны эти (положительные и отрицательные) распределяются по профилю самым прихотливым образом, без какой-

либо закономерности, нередко даже вопреки статически устойчивому распределению плотностей, так что более легкие слои оказывались расположеными ниже более плотных. По мере приближения общей температуры реки к 0° амплитуда уклонений постепенно убывала, измерялась уже сотыми долями градуса, однако полного выравнивания температуры не достигалось также и при 0° . Таким образом, непосредственными температурными измерениями устанавливалось, что несколько более холодные слои воды могли оказаться лежащими ниже

более теплых (следовательно, более плотных). Установлено было затем, что после охлаждения реки до 0° вода оказывалась иногда слегка переохлажденной (на сотые доли градуса, в очень редких случаях даже на $0^{\circ},1$). Такого порядка переохлаждение можно было констатировать не только на поверхности, но также и в промежуточных слоях, равным образом также и в придонном слое, при чем в последнем переохлаждение могло по временам даже превосходить таковое в остальных слоях.

На рис. 3 дан для примера ход температуры воды в Неве 2—5 и 8—9 декабря 1920 г. по ежечасным наблюдениям в течение круглых суток.

Из этой кривой видно, что температура воды почти все время равнялась $0^{\circ},00$, исключая 3, 5 и 8/XII, когда в течение нескольких

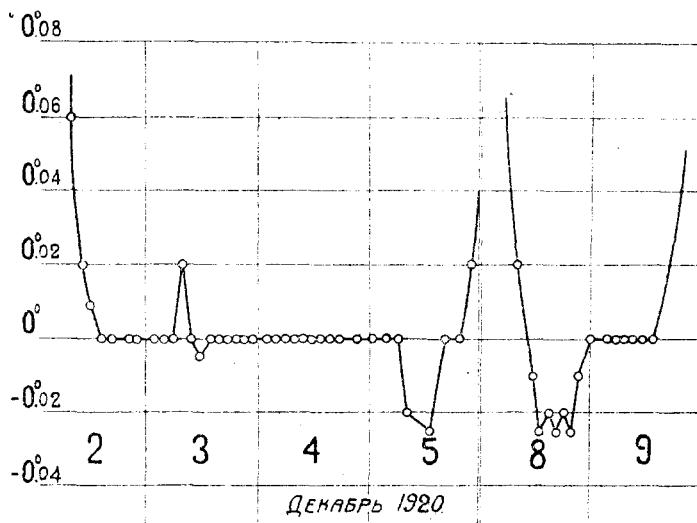


Рис. 3.

часов она оказалась на несколько сотых долей градуса выше или ниже 0° . В эти же именно периоды каждый раз было констатировано также и образование донного и вообще чешуйчатого льда. Любопытно отметить, что переохлажденное состояние сохранялось в течение многих часов, несмотря на присутствие в воде льда и несмотря даже на непрерывное образование новых порций льда. Из многочисленных рядов наблюдений в течение ряда лет можно было вывести заключение, что для появления донного льда и его более или менее быстрого нарастания требовалось непременное наличие переохлажденного состояния, хотя бы и ничтожно слабого, каковое должно было сохраняться, пока происходило выделение льда.

Таким образом, в отношении самого факта переохлаждения воды, порядка величины его и, наконец, возможного сохранения такового состояния в присутствии твердой фазы и даже безусловной необходи-

мости его для процесса кристаллизации, наблюдения в природе стояли в полном согласии с результатами опытов в лабораторной обстановке.

Вопросом о переохлаждении пришлось заняться столь детально с целью вырешить его исчерпывающим образом ввиду того, что именно в отношении него господствовали превратные представления, сводившиеся к неизменному отрицанию самой возможности такого эффекта в реке на основании известного факта уничтожения переохлаждения после введения твердой фазы. Такое недостаточно основательное обобщение факта, имеющего место лишь при определенных условиях (в лаборатории) на случаи с совершенно отличными условиями (в природе) приводило к неверным представлениям, препятствовавшим в значительной мере уяснению сущности явления со временем Гей-Люссака и по настоящее время.

Когда я только-что приступал к изучению явления донного льда, то некоторые из руководящих представителей комиссий, образованной в 1915 году специально для изучения этого явления, сомневаясь в возможности переохлаждения в реке, даже устраяли самый вопрос об этом из обсуждаемой программы «ввиду сомнительности эффекта и малой его изученности». Когда же непосредственные наблюдения все же обнаружили этот эффект, то в отчете об этих наблюдениях указывалось, что не вода переохлаждена, но что сами приборы охлаждались ниже 0° , температура же воды $= 0^{\circ}$ (Л. А. Ячевский, Гидрологический Вестник, 1915 г. № 4.). Неясным еще может показаться важный вопрос, каким образом поддерживается длительно (в течение многих часов) переохлажденное состояние при наличии твердой фазы и даже при непрерывном выделении новых порций льда. До фактического выяснения этого обстоятельства многие выражали недоумение и сомнение в возможности его ввиду того, что уже первые порции выделенного льда должны были бы, по их мнению, уничтожить имевшееся весьма слабое переохлаждение.

Непосредственные измерения, однако, показали, что, вопреки сомнениям, переохлажденное состояние не уничтожается, и кристаллизация не только не прекращается, но протекает иногда с достаточной даже энергией¹⁾.

Дело в том, что обыкновенно упускался из виду важный момент, являющийся в данном случае решающим. Это — общая теплопотеря воды, обусловливающая собою весь процесс образования льда вообще. Известно (по определению Гомена), что в холодное осенне время водоемы теряют большие количества тепла. Отнесенная к единице поверхности (1 см.²) эта теплопотеря может превзойти 1 гр. - калорию в минуту, с чем согласуются также и определения теплопотери воды в опытах с искусственным воспроизведением льда (при одинаковых условиях).

¹⁾ Известны случаи образования донного льда в реке в течение часа и даже менее.

При столь мощной теплопотере с поверхности температура воды тем не менее всегда остается приблизительно одинаковой по всей глубине. Это указывает на одинаковое участие всех слоев в теплопотере, а также на то, что теплопередача между всеми слоями легко и быстро осуществляется в результате основательного перемешивания всех слоев при турбулентном движении воды в реке. При облегченной, таким образом, конвективной теплопередаче и ввиду мощности общей теплопотери скрытое тепло, выделяющееся, напр., в придонной области, не может здесь застаиваться и накапливаться, но, будучи уведено через все слои воды в воздух, содействует длительному сохранению переохлажденного состояния, поддерживая, таким образом, благоприятные для кристаллизации условия¹⁾.

Хотя уже вышеизложенного достаточно для уяснения сущности явления, мне хотелось еще поставить опыт с воспроизведением первичного слоя донного льда в условиях, не оставляющих никакого сомнения в том, что лучеиспускание не только не является первоосновой этого явления, как полагает Барнес, но может произойти совершенно независимо от него, с другой стороны, что оно не обусловлено заносом льда с поверхности, как утверждает Айткен. С этой целью я поставил простой опыт образования донного льда при условиях, гарантирующих безусловную невозможность как заноса льда с поверхности, так и участия лучеиспускания дна. Постановка опыта была такая.

Стеклянный сосуд с водою, экраном *c* и камнями *bb* на дне его (рис. 4) устанавливался на одни или двое суток в помещении с постоянною температурою приблизительно в $-0^{\circ},1$. После внесения через трубку *d₂* кусочка льда, вода перемешивалась некоторое время мешалкой *e* и затем оставлялась в покое. Вскоре можно было наблюдать появление на поверхности камней сначала отдельных элементов льда, увеличение их размеров и затем массовое обрастание камней слоем рыхлого льда, словно мхом, при чем вода оставалась в спокойном состоянии (см. фотографию, рис. 5).

Таким образом, искусственное образование первичного слоя донного льда при условиях, вполне исключающих как занос льда с по-

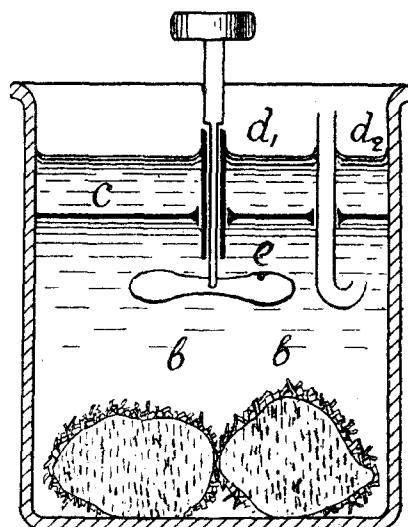


Рис. 4.

¹⁾ Я позволил себе несколько дольше остановиться на этих элементарных соображениях, потому что в литературе даже в этом отношении преобладали превратные представления, основанные на предвзятых предположениях.

верхности, так и участие теплового излучения со дна, дает прямое указание, в каком направлении следует искать причину явления.

И в случае рек механизм образования на дне первичного слоя, повидимому, тот же, как и при искусственном его воспроизведении.

На основании многолетнего опыта, вынесенного из наблюдений над донным льдом в природе и из множества раз воспроизведенного явления в лабораторной обстановке, мне представляется сущность явления вполне понятной, не возбуждающей никакого сомнения и уже не заключающей в себе элемента парадоксальности.

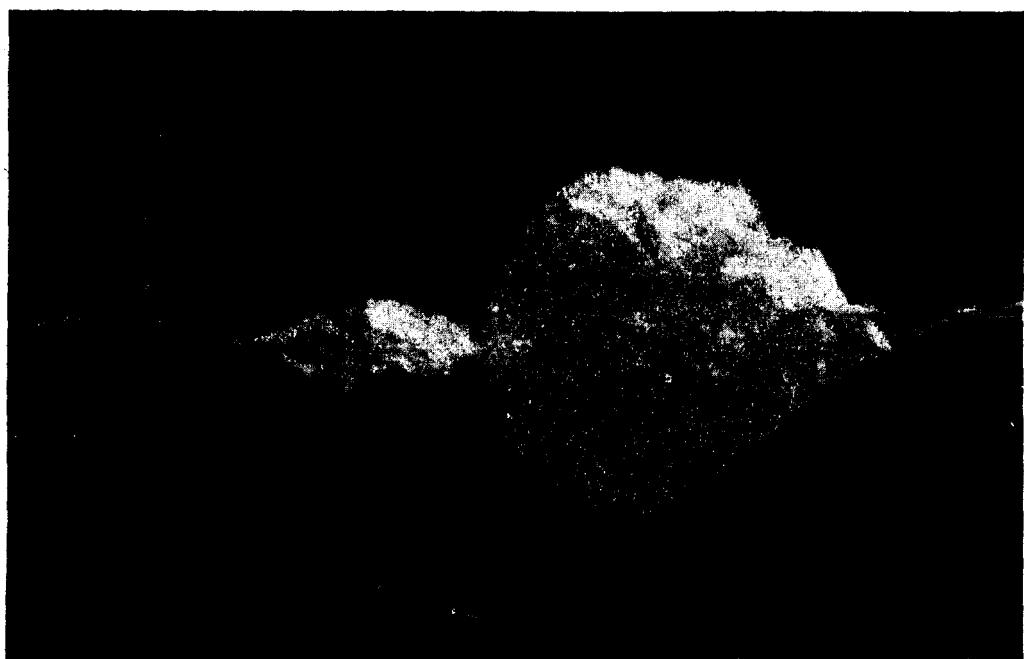


Рис. 5.

По крайней мере, на основании своего опыта мне удавалось в громадном большинстве случаев заранее предвидеть, наступит или не наступит данное явление, а также определить условия места и времени его наступления. В частном случае Невы для меня совершенно ясны причины исторических случаев образования донного льда, вообще причины редкости явления на одних водоемах и, наоборот, частоты его на других.

В свете новых фактов, добытых опытным путем в лабораторной обстановке и путем наблюдений в природе, является теперь нетрудным дать ответ на вопрос, поставленный еще в первой половине прошлого века и всплывающий теперь снова ввиду того, что он остался до настоящего времени без удовлетворительного ответа: почему в реках лед образуется иногда на поверхности, иногда же на дне.

Английские авторы обзора о современном положении вопроса о донном льде ставят также и новый вопрос о причине редкости этого явления для некоторых водоемов, в частности для Lochrutton (на юге Шотландии) — всего один случай замерзания водопровода за все 45-летие его существования, несмотря на то, что бывали зимы гораздо более суровые и продолжительные, чем 1917 г. К этому я мог бы добавить из истории Петроградского водопровода два сравнительно редких случая грандиозного образования донного льда 8 декабря 1894 г. и 14 декабря 1914 г., повлекших за собою прекращение водоснабжения для всего Петрограда.

Анализ всей совокупности условий, при которых произошли оба исторических случая, приводит к заключению, что причиной здесь является лишь редкое, имевшее место только в упомянутые два года, совпадение исключительно благоприятных обстоятельств, обеспечивших особенно мощную теплопотерю реки, поверхность которой оказалась внезапно лишенной обычно образующегося при таких условиях погоды ледяного покрова, который обычно и предохраняет в значительной степени воду от сильного охлаждения. В обоих случаях внезапное обнажение реки произошло во время сильного ледохода, вследствие сильного образования затора льда в реке несколько выше того участка, в пределах которого в последующий период (в течение ночи) все дно Невы оказалось покрытым толстым слоем льда. Метеорологические условия в это время оказались весьма благоприятными (низкая температура воздуха, —11° и —8°, при резком ветре и ясном ночном небе) для того, чтобы вызвать сильнейшую теплопотерю воды. При этих условиях и принимая во внимание полную подготовленность реки к выделению льда, обусловленную продолжительным ледоходом в предшествующий период, в воде, слегка переохлажденной во всей массе до дна, лед должен был образовываться в форме мелких элементов, вообще говоря повсюду, но преимущественно у дна, где они и могли удержаться на месте сами и удержать (вследствие режеяции) также и другие частицы льда, массами образующиеся внутри воды.

Теплопотеря воды в сильнейшей степени зависит, помимо метеорологических факторов, от состояния поверхности ее (обнажения или покрытия льдом, отлично предохраняющим от сильной теплопотери). Недаром все наблюдатели единодушно свидетельствуют об отсутствии льда на поверхности в то время, когда он образуется на дне. Этому чрезвычайно важному обстоятельству никто, однако, не придавал особого значения, и на роль его не обращалось внимания.

Кроме того следует отметить, что обнаженная поверхность, обусловливая сильную теплопотерю, способствует образованию (при прочих равных условиях) гораздо больших количеств донного льда, чем обычного поверхностного, каковое обстоятельство также неизменно отмечают наблюдатели.

С другой стороны, известно, что те участки реки, которые в течение всей зимы остаются обнаженными (напр. в порогах), являются, если можно так выразиться, лабораториями донного льда, который затем, всплывая, скапливается в большем количестве под поверхностным льдом на протяжении десятков километров в виде мощных пластов рыхлого льда (шуга) толщиною 5—8 метров¹⁾.

Таким образом, решающим моментом для образования донного льда является наличие максимальной теплопотери воды, возможной лишь при отсутствии льда на поверхности. Ввиду того, что стечние благоприятных обстоятельств, обеспечивающих весьма мощную теплопотерю, случается обыкновенно редко, выдающиеся случаи образования донного льда происходят также лишь изредка. Поэтому очень редкими должны быть подобные случаи в Англии с ее мягким климатом. Наоборот, в Сибири, с ее суровым климатом и быстро текущими реками, необходимые условия обеспечиваются ежегодно, вследствие чего донный лед там образуется в больших количествах ежегодно (напр. на Ангаре) и относится к заурядным явлениям. Переохлаждение воды является также необходимым условием, но далеко не достаточным, так как уже первые порции образующегося льда выделили бы скрытое тепло в количестве, достаточном для уничтожения переохлаждения. Поэтому решающее значение приобретают факторы, способные непрерывно поддерживать такое состояние, несмотря на выделение льда, а вместе с этим и выделение скрытого тепла.

Факты, добытые путем опыта и наблюдений, сопровождаемых точными измерениями, вместе с установленным уже давно фактом полной непрозрачности воды (в больших толщах) для волн, соответствующих предполагаемой радиации речного дна, делают все прежние и современные догадки о природе явления, считавшегося парадоксальным, либо излишними, либо совершенно неприемлемыми; сюда, в особенности, относится объяснение путем излучения, просто по недоразумению считающееся в Америке наивероятнейшим еще и поныне.

В Англии Айткен²⁾, хотя и отвергает возможность образования донного льда путем излучения, однако обосновывает это иначе, а именно невозможностью, по его мнению, перехода воды в твердое состояние без предварительного сильного переохлаждения воды в несколько градусов. Ввиду очевидной невозможности столь сильного охлаждения воды у дна, он не допускает самой возможности образования льда на дне *in situ* и, подобно Гей-Люссаку, объясняет появление его здесь заносом с поверхности, где он и образуется в непосредственном контакте с источником охлаждения. Непосредственные опыты показали, однако, что для перехода воды в твердое состояние вовсе не требуется столь сильного охлаждения, как думал Айткен, что для этого, наоборот,

¹⁾ М. Ф. Ционглинский. О наблюдениях над замерзанием реки Невы и исследованиях заторов на ней СПБ. 1905.

²⁾ I. Aitken. I. c.

достаточно даже ничтожного переохлаждения при условии наличия в воде затравки (что в естественных условиях вполне обеспечивается путем постоянного заноса ледяных частиц из морозного воздуха). Ввиду несостоительности, таким образом, исходной предпосылки Айткена, его объяснение становится необоснованным и впритом излишним.

Теперь, по выяснении всех условий образования донного льда, приходится удивляться тому, что столь простое и естественное явление могло в течение столь долгого времени считаться загадочным и даже, по выражению некоторых, «тайным феноменом природы», относительно природы которого высказывались самые превратные догадки и предположения.

Объяснения, лишь казавшиеся вероятными, но фактически необоснованные, как это ни странно, принимались за истинные, начиная с давних пор и до самого последнего времени. Зато практические применения таких беспочвенных учений (преимущественно в Америке) неизменно приводили к определенным отрицательным результатам.

Опыты и факты наблюдений, отвергнув все искусственные объяснения и фантастические толкования, дают теперь возможность заметить их простым и до очевидности понятным объяснением в полном согласии с тем, что известно о переходе вещества из одного состояния в другое.