

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ
СЛУЖБЫ ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ПРОВЕРЕНО
1951 г.

ПРОВЕРЕНО
1950 г. 550.3

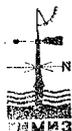
Т Р У Д Ы ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

ВЫПУСК 3 (65)

ГОЛОЛЕД
(Сборник статей)

Под редакцией

д-ра физ.-мат. наук
В. В. БАЗИЛЕВИЧА



БИБЛИОТЕКА
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
10704

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1947

ПРЕДИСЛОВИЕ

Гололедно-изморозевые образования на наземных предметах, несмотря на территориальную ограниченность этого явления, имеют весьма важное практическое значение для некоторых районов нашей страны.

Этот своеобразный вид геофизических явлений, по которым ежегодно собирается большой статистический материал наблюдений, не получил, однако, еще всестороннего освещения не только с технической стороны, но также с физической, синоптической и климатологической точек зрения.

Не представляет сомнений, что разрешение практических задач в этом вопросе должно осуществляться не только на основании тщательной обработки собранного статистического материала, но также путем изучения самого процесса гололедообразования и влияния на него климатических условий.

Поэтому рассмотрение гололедно-изморозевых явлений с различных сторон имеет существенное значение.

В настоящий сборник вошли работы как теоретического, так и практического характера, выполненные в основном в период военного времени, которые по тем или иным обстоятельствам не были опубликованы ранее.

Участие в сборнике лиц, не принадлежащих к составу сотрудников Главной геофизической обсерватории—В. В. Бургсдорфа, А. А. Дмитриева и А. Г. Балабуева — придает сборнику роль объединяющего начала.

О ФИЗИКЕ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Образования гололеда и изморози имеют очень большое практическое значение. Мощные гололедно-изморозевые отложения на проводах линий электропередачи и связи¹ приводят к их значительным механическим перенапряжениям, отчего возможны разрывы проводов, тросов и даже разрушение опор. Известны случаи, когда в результате гололедных аварий было полностью дезорганизовано электроснабжение и на длительные сроки нарушена нормальная хозяйственная жизнь целых районов. Хорошо известно также, что обледенение в воздухе является одним из опаснейших явлений для самолетов и в ряде случаев приводило к катастрофам, в особенности в высоких широтах.

Несмотря на все значение гололедной проблемы, вопросы физики гололеда и изморози изучены до сего времени совершенно недостаточно и противоречиво толкуются многими исследователями.

Вместе с тем разработка рациональных принципов борьбы с опасным обледенением настоятельно требует достаточно полного выяснения физики этого сложного процесса.

Общие метеорологические условия при образовании гололеда и изморози известны в достаточной мере. Последние отлагаются обычно при температурах немного ниже нуля, в туманную погоду, или же при выпадении переохлажденного дождя.

Влажность воздуха бывает при этом очень высокой, близкой к 100%.

При таких условиях переход сконденсированной влаги в твердое состояние является вполне естественным и даже неизбежным, поскольку соприкосновение переохлажденных капелек воды с „затравкой“ в виде кусочка льда или с поверхностью твердого тела, находящегося при температуре ниже 0°, безусловно нарушает ее переохлажденное состояние и влечет за собой быструю кристаллизацию [1,2].

Очевидно любой элемент линии удовлетворяет обоим этим условиям и должен быть поэтому естественным центром кристаллизации переохлажденной влаги атмосферы.

Одновременно возможен непосредственный переход из парообразного состояния в твердое, минуя жидкую фазу, так называемый процесс сублимации. Такие случаи указывались изредка наблюдателями и отмечены в литературе, хотя, повидимому, встречаются они сравнительно редко, а размеры таких отложений, как правило, невелики. В огромном большинстве случаев, а при мощных образованиях всегда, наблюдателями отмечается туман с отрицательными температурами. Разумеется, явления сублимации возможны и при тумане, одновременно с кристаллизацией. Вопрос о том, который из этих двух процессов является определяющим, имеет большое научное и практическое значение, поскольку содержание сконденсирован-

¹ Известны случаи, когда нагрузки от гололеда и изморози достигали нескольких десятков килограмм на 1 пог. м провода. Случаи отложений в 3--5 кг/м почти ежегодно наблюдаются в Донбассе и на Кавказе.

ной воды и пара при отрицательных температурах близко друг к другу [3,4] и, следовательно, степень их участия в гололедообразовании имеет существенное значение при оценке возможной интенсивности отложений.

В настоящее время по этому поводу имеется две противоположные точки зрения. Некоторые исследователи, как, например, Ассман [5], Келёр [6,7], Пепплер [8], Драппье [9], Воронцов [10], Хргиан [11] считают кристаллизацию сконденсированной влаги определяющей процесс, в то же время Вегенер [3], Вейнберг [1], Гемфрис [12], Демок [13], Меттиас [14], Аргини [15], Туроверов [16] придают очень большое значение явлениям сублимации, причем некоторые из них полагают, что собственно изморозь следует считать образующейся лишь в процессе сублимации¹.

Столь серьезное расхождение объясняется, по нашему мнению, теми большими трудностями, с которыми связаны исследования изморози и гололеда в природных условиях, где невозможно направлять и регулировать изучаемый процесс.

Именно по этим причинам для выяснения физической картины явлений мы полагали необходимым прибегнуть к методам лабораторного исследования. Заметим, что опыты получения льда (не изморози) из переохлажденных капелек делались Чернышем [1], а при испытаниях в аэродинамической трубе с переохлажденными каплями на моделях самолетов был получен мутноватый гладкий лед [17]. Опыты по искусственному обледенению крыла самолета в лаборатории велись также за границей, однако, они не ставили задачи изучения физики гололедообразования.

К опытам Тбилисского научно-исследовательского гидро-энергетического института (ТНИСГЭИ) было приступлено с 1937 г. Эксперименты проводились в холодильных камерах промышленного типа; для получения потока переохлажденных капелек применялось распыление воды с помощью эжектора² и конденсации пара, вырабатываемого небольшим электрическим котлом³.

В первом опыте, в холодильной камере с обычной для нее влажностью порядка 98—100%, был помещен провод, который оставался там в течение длительного срока при различных температурах. Никаких заметных отложений при этом не наблюдалось, если не считать появления коротких ворсинок в отдельных точках его поверхности длиной порядка 0,5 мм. Вслед за этим провод был подвергнут пульверизации распыленными каплями (с диаметром порядка 50 μ), при температуре -5° . Результатом этого было образование типичной плотной изморози.

Чтобы учесть повышенную вентиляцию провода при пульверизации, которая по Робичу [18] способствует сублимации, был проделан дополнительный эксперимент, при котором провод обдувался один раз с помощью вентилятора, второй раз — от эжектора. В последнем случае эжекторная установка приводилась в действие, но воды в нее не подавалось. Отложений изморози снова не последовало.

После этого в камере был создан туман (путем конденсации пара), и приведен в действие вентилятор. В течение небольшого промежутка времени на лопастях отложился толстый слой типичной кристаллической изморози (рис. 1).

Далее была сделана попытка повторения этого опыта в среде с относительной влажностью не менее 100%, но в отсутствии тумана. Этот опыт опять-таки никаких сколько-нибудь заметных образований изморози не дал; не удалось получить изморози и при редком тумане, в то время как при густом она садилась чрезвычайно интенсивно.

Для большей надежности выводов был поставлен еще один контрольный опыт с пульверизацией от эжектора, причем воздух в камере был предварительно высушен.

¹ В настоящей статье авторами изморозь характеризуется по форме осадка (*Прим. ред.*).

² Размеры капелек регулировались подбором эжекторных наконечников.

³ Аппаратура для опытов была изготовлена инж. Г. П. Зедгинидзе. Кроме автора эксперименты проводились проф. А. Г. Балабуевым, инж. Г. П. Зедгинидзе, И. Э. Петкевич, Б. Б. Тимофеевым, Г. К. Ткешелашвили и техн. Г. В. Свинимовшвили.

В результате на проводе снова образовался осадок типичной кристаллической изморози, фотография которого представлена на рис. 2 (о толщине слоя изморози можно судить по сделанному вырезу). Следует отметить, что изморозь ложилась сплошным слоем и какой-либо тенденции к ее концентрации на остриях, краях и т. п. не замечалось.

По своему внешнему виду и строению „лабораторная“ изморозь ничем не отличается от естественной.

При прозрачном воздухе небольшое количество изморози удалось получить на трубе, внутри которой для этого прогонялась охлаждающая смесь.

Для теории вопроса очень важно установить причины, в силу которых явления сублимации имеют столь малое значение.

Нам представляется, что здесь сказываются два основных момента. Во-первых, с чисто энергетической стороны, имеющей очень большое значение при обледенении, процесс сублимации оказывается затрудненным, так как выделяющееся при этом тепло почти в 10 раз превосходит тепло кристаллизации. Во-вторых, водяной пар при своем движении вокруг провода полностью следует за направлением струй воздуха, обтекающих его поверхность в соответствии с законами аэродинамики, в то время, как капельки воды, обладающие большой инерцией, сталкиваются с проводом и замерзают на нем.

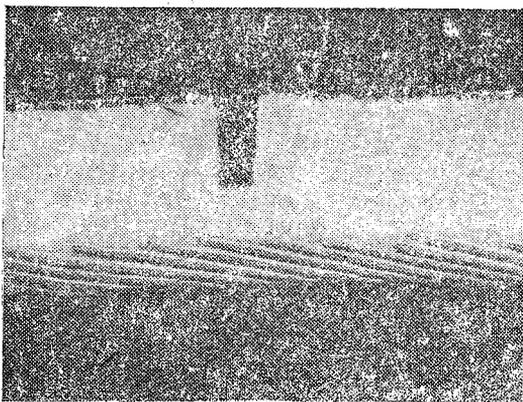


Рис. 2. Осадок на проводе кристаллической изморози в результате пульверизации от эжектора.

определяющих структуру отложений, т. е. появление гололедных или соответственно изморозевых форм в процессе кристаллизации.¹

Как указывал Вегенер в своей термодинамике атмосферы еще в 1911 г., решающее значение при этом имеет скорость замерзания. При медленном процессе капля успевает растечься, в силу чего образуется однородный ледяной слой. Наоборот, при быстром замерзании следует ожидать изморозевых отложений.



Рис. 1. Отложения изморози на лопастях вентилятора.

Таким образом объективные физические условия благоприятствуют кристаллизации и в совокупности с результатами экспериментов можно считать установленным ее определяющее значение.

Добавим, что большое значение условия обтекания для обледенения хорошо подтверждается наблюдениями Вейнберга [19].

Второй принципиальный вопрос для физики гололеда касается условий,

¹ Кристаллическая структура осадка при сублимации не подвергается сомнению.

Поскольку скорость замерзания зависит не только от температуры, но и от размеров капли—оба эти фактора должны влиять на структуру осадка. Аналогичные соображения, хотя и менее четко, развиваются в некоторых позднейших работах [7, 8, 20].

Так, многие авторы полагают, что решающее влияние на структуру отложенный имеет величина капель. К ним относятся, например, проф. Молчанов [21], Гемифрис [22], Шинце [23], Самуэльс [24].

Другая группа, как проф. Аганин и Гапонов [25], Андриус [26] и отчасти Пепплер [8] считают определяющей температурой среды.

Наиболее полно последняя точка зрения была развита двумя первыми исследователями, причем Гапонов в подтверждение ее приводит обработку наблюдений Одесской обсерватории [25]. По этим данным образование изморози наблюдалось лишь при температуре ниже $-1,3^{\circ}$, а гололедных форм — в диапазоне от нуля до $-2,2^{\circ}$ при туманах, с возможностью понижения до $-2,9^{\circ}$ в случае переохлажденного дождя. Поскольку скорость кристаллизации воды от малых величин при температуре около 0° [27] возрастает до нескольких метров в минуту уже при переохлаждении до $-3,5^{\circ}$ [27, 28], ее влияние на процесс вполне понятно. Позволим себе отметить, однако, что и соотношения в размерах капель могут также изменяться в десятки и сотни раз, т. е. весьма сильно. Кроме того, нам представляется, что большое значение имеет энергетический эффект, который обычно не учитывается.

Действительно, в установившемся процессе кристаллизации между выделяемым теплом, в силу перехода в твердое состояние¹, и теплоотводом в среду должно соблюдаться определенное равновесие. В общем случае оно может быть выражено уравнением:

$$[\alpha + c(g_1 + g_2)](t_1 - t_2) = q_1 g_1 + q_2 g_2 + \omega_i, \quad (1)$$

где α —коэффициент теплоотвода от поверхности, на которой происходит отложение (в $\text{вт}/\text{см}^2$), c —теплоемкость льда, равная $2,09 \text{ вт} \cdot \text{сек.}/\text{г}$, g_1 —количество осадка, отлагающегося путем кристаллизации ($\text{г}/\text{см}^2 \cdot \text{сек.}$), g_2 —количество осадка, отлагающегося путем сублимации ($\text{г}/\text{см}^2 \cdot \text{сек.}$), t_1 —температура поверхности, на которой происходит осаждение (в градусах), t_2 —температура окружающей среды (в градусах), q_1 —скрытая теплота кристаллизации, равная $332 \text{ вт} \cdot \text{сек.}/\text{г}$, q_2 —скрытая теплота сублимации, равная $2820 \text{ вт} \cdot \text{сек.}/\text{г}$, ω_i —количество тепла, выделяемое электрическим током, отнесенное к 1 см^2 поверхности кристаллизации (при отложениях гололеда и изморози на проводах).

Как видно, температура обледеняемой поверхности отличается от температуры среды и будет зависеть еще от целого ряда других причин, как например, количества отлагающихся осадков в единицу времени и условий теплоотвода. Следовательно, и температура формирования гололедно-изморозевых образований будет отличаться от температуры среды. При очень интенсивной подаче влаги, даже при мельчайших капельках и низких температурах, можно получить поэтому чистые гололедные формации. Более того, при особенно больших количествах подаваемой влаги часть капелек вообще не сможет замерзнуть и будет скатываться с провода.

К факторам, способствующим уплотнению осадка, следует отнести поэтому повышение влагосодержания в 1 м^3 воздуха, при котором увеличивается количество кристаллизующейся влаги и, следовательно, и температура формирования осадка.

В этом мы видим одну из главнейших причин, по которой при наличии мороси с туманом всегда отлагаются гололедные формы, в то время, как туманы при отсутствии мороси дают, как правило, образование изморози различной плотности.

¹ Живой силой капли пренебрегаем, так как она составляет примерно $0,01\%$ энергии кристаллизации.

С целью проверки всех этих соображений нами был предпринят ряд экспериментов в холодильной камере. Первые опыты, сделанные еще в 1931 г., [29] позволили подтвердить, что гололедные и изморозевые формы зависят как от размера капелек, так и температуры среды, а в значительно более обширных последующих экспериментах нам удалось даже наблюдать последовательный переход от белой кристаллической изморози к плотным образованиям, полностью тождественным обычному водяному льду уд. весом 0,9. Такой переход оказалось возможным осуществить, сохраняя неизменным размер капель и варьируя температуру среды, либо же меняя диаметр капелек при неизменной температуре¹. Во всех этих опытах количество подаваемой влаги оставалось неизменным.

Следует подчеркнуть, что при температурах $-3,5$ — -4° нам удалось зафиксировать гололедные формации при проведении опытов в достаточно близких условиях к природным, при диаметре капель порядка нескольких десятых миллиметра.

Более того, при температуре -7° и капельках с диаметром в несколько десятков микрон, т. е. при наличии всех условий для выпадения изморози, путем повышенной подачи влаги, нам легко удалось получить последовательный переход от изморози к более плотным формам и, в частности, вполне чистые гололедные образования.

Что же касается материалов Гапонова, то в части гололеда они находятся в противоречии с нашими данными и с наблюдениями ряда других авторов. Так, например, Самуэльс [24] считает наиболее типичными температурами при образовании гололеда -4 , -5° , Муретов [30] полагает нижний предел гололедообразования при -5° , каковую цифру подтверждает и Туроверов [31] по данным Ново-Пятигорской геофизической станции.

Заметим попутно, что ценность материалов Гапонова значительно снижает то обстоятельство, что получены они не в сильно гололедном районе.

С целью внесения полной ясности в этот вопрос нами были проанализированы материалы обширных гололедных наблюдений, проведенных под нашим руководством на большом количестве гололедных станций Северного Кавказа за ряд лет.

Наличие гололедографов, записывающих все процессы гололедно-изморозевых отложений на опытном проводе, делает эти материалы особенно ценными, поскольку период нарастания осадка фиксировался с большой точностью.

Всего нами было обработано 350 случаев², из которых 252 относились к изморози и 98 к гололеду. Это число почти в 3 раза превышает количество наблюдений Одесской обсерватории. Результаты обработки через интервал в 1° представлены на рис. 3. Ход их доказывает, что наиболее благоприятные температуры для гололеда действительно находятся в диапазоне от 0° до -3° , однако достаточно большое количество случаев падает и на более низкую температуру. Предельной по нашим данным является -6° .

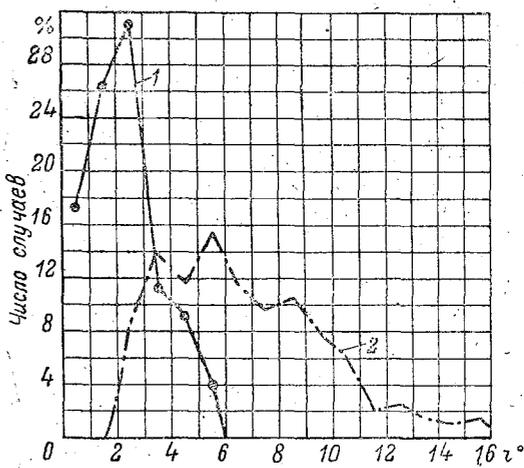


Рис. 3. Результаты обработки гололедных наблюдений через интервал в 1° .

1 — гололед; 2 — изморозь.

¹ Температуру капель мы полагаем равной температуре воздуха, что вполне допустимо согласно данным Скотта [17], принимая во внимание их малые размеры.

² За один случай принимали процесс длительности не более 8 час. Как правило, колебания температуры были при этом небольшими.

Эти материалы вместе с данными Туроверова и Муретова опровергают тезис о решающем значении температур на характер образований, поскольку значительный температурный диапазон, в котором наблюдаются оба вида отложений—гололед и изморозь, позволяет говорить о наличии ряда других существенных причин, влияющих на характер осадка. Что касается изморози, то полученная кривая находится в соответствии с характерными цифрами по имеющимся литературным данным. Интересно упомянуть, что высшие температуры для изморози, полученные нами и Гапоновым, практически совпадают.

Рассмотренные материалы наблюдений в природных условиях, в сочетании с лабораторными исследованиями, полностью подтверждают принципиальную правильность высказанных выше положений, кроме того, они наглядно показывают, что структура и плотность осадка является функцией ряда соразмерных физических факторов.

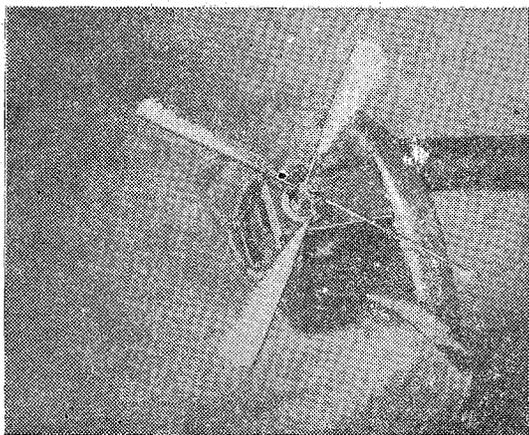


Рис. 4. Влияние ветра на образование гололедно-изморозевых осадков из переохлажденных капелек на лопастях вентилятора.

Рассмотрим теперь, как взаимно сочетаются все эти явления в природе.

При мороси и переохлажденном дожде, когда температура воздуха не очень низкая, капли падают на провод в очень большом количестве, имеют значительный размер и не слишком переохлаждены [1].

Таким образом налицо, не какое-либо одно, а все три условия, благоприятствующие образованию гололедных форм.

При низких температурах, размеры капелек меньше (способность к переохлаждению у мелких капелек

выше), количество сконденсированной влаги также уменьшается (морось и дождь, как правило отсутствуют), и, следовательно, *весь комплекс условий становится благоприятным для отложений изморози и, наоборот, неблагоприятным для гололеда.*

Как из этого видно, совокупность природных условий приводит нормально к известной определенности в структуре гололедных образований. Этим в частности и объясняется, что некоторые авторы, в частности проф. Маттиас, использовавший в своем докладе [14] обширные материалы гололедных наблюдений в Германии, вообще не рассматривает отложений с удельным весом в пределах 0,25 — 0,6. Отметим попутно, что сами условия образования гололеда характеризуются Маттиасом неправильно.

Наш анализ позволяет объяснить упомянутые различные мнения о причинах, определяющих структуру отложений.

Для характеристики влияния ветра на развитие гололедно-изморозевых образований в среду из переохлажденных капелек помещался вентилятор, лопасти которого были заменены толстыми проволоками. В результате образовался осадок, фотография которого представлена на рис. 4.

На рис. 4 видно, что толщина слоя изморози возрастает от оси вращения к концу проволоки по линейному закону, т. е. пропорционально относительной скорости потока воздуха к проводу.

Вывод этот был проверен нами для примерного диапазона ветров 0—12 м/сек. наиболее характерных при гололедообразовании на линиях электропередачи.

Сравнение удельных весов изморози в различных точках проволоки не показало какой-либо разницы между ними, что позволяет заключить о независимости

или малой зависимости характера отложений от скорости ветра. К такому выводу пришел и Гапонов в упомянутой выше статье [25].

Поскольку количество кристаллизуемой влаги в первом приближении пропорционально скорости потока воздуха, а коэффициент теплоотдачи примерно следует тому же закону¹, естественно, что температура кристаллизации мало зависит от силы ветра и потому полученный вывод является естественным. Отметим, что нельзя согласиться с объяснением Гапонова, который полагал, что независимость структуры осадка от ветра обусловлена компенсацией значительного растекания капель при более сильных ударах повышенной теплоотдачей при крепком ветре, поскольку энергетический эффект живой силы капель чрезвычайно мал и составляет одну десятитысячную от теплового. Если перейти к более высоким скоростям воздуха, достигаемым в авиации, то там теплоотдача растет медленнее, чем скорость ветра.

При таких условиях можно ожидать тенденции к повышению плотности осадка на самолетах по сравнению с наблюдаемой на проводах. Последнее обстоятельство, кстати сказать, и имеет место в действительности.

Чрезвычайно интересным вопросом физики гололеда является влияние электрического поля, с которым практически приходится сталкиваться в случае осадков на линиях электропередач высокого напряжения.

Повышенная интенсивность процесса при наличии напряжения отмечается в отдельных зарубежных работах [31,32]. Кроме того, о возможности влияния электрических зарядов на обледенение самолетов указывает Баракан [33], ограничившийся, правда, изложением известных физических предпосылок, стимулирующих образование ледяной корки. Наши данные по Северному Кавказу, Закавказью и Уралу подтвердили повышенную интенсивность гололедных отложений при наличии поля, причем они оказались примерно на 30% больше наблюдаемых на обесточенной линии (14—15 см в диаметре против 11—12 см).

В весьма ценных материалах Исследовательского об-ва по высоковольтным установкам допускается в принципе повышение интенсивности гололедного процесса при наличии напряжения, однако, специально отмечается, что физическая природа явления не ясна [34].

Попытаемся поэтому рассмотреть ее более полно.

Повышенную интенсивность гололедного процесса при наличии электрического поля нельзя объяснить высоким содержанием ионов, поскольку Вильсоном еще в 1897 г. было доказано, что конденсация на ионах возможна лишь при огромном пересыщении (400—700%). Не может усилить гололедообразование и собственный заряд капель; принимая во внимание его малую величину (500—3000 элементарных зарядов [35]) и переменное поле тока. Серьезное значение может иметь наведенный заряд, обуславливающий образование диполя.

Сила притяжения в этом случае может быть выражена известным уравнением:

$$F = M \operatorname{grad} E, \quad (2)$$

где M —момент диполя, а E —напряженность поля.

Рассматривая капельку, как проводящий шар², и, полагая поле в пределах капли достаточно равномерным³, можем написать

$$M = r_k^3 E, \quad (3)$$

где r_k — радиус капли.

¹ Для диапазона скоростей ветра 0—10 м/сек.

² Такое допущение справедливо, поскольку диэлектрическая постоянная капли очень значительна ($\epsilon = 81$), а удельное сопротивление дождевой воды (3,104 ом·X см) мало с точки зрения процесса в электрическом поле.

³ Принимая во внимание малый размер капелек, такое допущение справедливо.

Напряженность поля на расстоянии ρ от провода с радиусом r будет

$$E = \frac{U}{\rho \ln \frac{D}{r}} \quad (4)$$

Здесь U — потенциал провода, а D — расстояние между проводами. Подставляя выражения из уравнения (3) и (4) в формулу (2), легко находим

$$F = - \frac{r^3 \kappa}{\rho^3} \cdot \frac{U^2}{\ln^2 \frac{D}{r}} \quad (5)$$

Как видно, сила притяжения капли пропорциональна квадрату приложенного напряжения¹ и обратно пропорциональна кубу расстояния. По этой причине ее влияние резко падает даже при небольшом удалении от провода.

Для количественной характеристики вопроса силу электрического притяжения интересно сравнить с весом капли.

Последняя величина будет:

$$G_{\kappa} = \frac{4}{3} \pi r^3 \kappa g \quad (6)$$

откуда

$$\frac{F}{G_{\kappa}} = \frac{3}{4 \pi g} \cdot \frac{U^2}{\ln^2 \frac{D}{r}} \cdot \frac{1}{\rho^3} \quad (7)$$

где g — ускорение силы тяжести.

Из уравнения (7) видно, что соотношение между силой притяжения и весом не зависит от размеров капли.

Полагая $U = \frac{110}{\sqrt{3}}$ кв, $D = 5$ м, $r = 0,54$ см, получим следующий вывод (табл. 1).

ρ см	0,54	0,7	0,8	1	1,5	2
$\frac{F}{G_{\kappa}}$	1,49	0,68	0,45	0,24	0,07	0,03

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что, хотя электрическая сила значительно меньше силы тяжести, все же она может играть заметную роль на небольших расстояниях от провода. Проявлению сил притяжения благоприятствуют слабые ветры — весьма частые при образовании гололеда и изморози, а также резкое снижение скорости гололедонесущего потока у подветренной поверхности проводов, отчего относительное влияние электрических сил возрастает.

Все эти моменты позволяют говорить о значении электрического напряжения как дополнительного фактора, способствующего отложению гололеда и изморози на проводах, но его нельзя рассматривать как одну из причин, определяющих скорость гололедообразования.

¹ В полях переменного тока в расчет поэтому следует вводить действующие значения. Потенциал должен быть выражен в абсолютной электростатической системе единиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейнберг Б. П. Лед. ОНТИ, 1940.
2. Вейнберг Б. П. О степени соответствия опытным данным взглядов проф. В. Я. Альтберга на процессы кристаллизации переохлажденной воды. Мет. и гидр., № 9, стр. 3, 1939.
3. Вегенер А. Термодинамика атмосферы. ОНТИ, 1935.
4. Бернштейн Р. и Брюкман Б. Введение в метеорологию, ГОНТИ, 1938.
5. Assman R. Met. Ztshs, 339, 1889.
6. Köhler H. Naturw. Untersuch. in Schwed Lappland. В. 11.
7. Köhler H. Geof. Pubb, № 1, 1921; № 6, 1922.
8. Reppler W. Beitr. z. Phys. d. fr. Atmosph, 111, 1921.
9. Drappier I. Rev. Gen. Electric, 27-X, 1934.
10. Воронцов П. А. Аэрологические условия обледенения самолетов. Изв. АН, № 3, стр. 335, 1940.
11. Хргиан А. Х. Физико-метеорологические условия наиболее опасного обледенения самолета. Мет. и гидр., № 3, стр. 85, 1937.
12. Humphreys W. Month. Weath. Rev., № 6, 1930.
13. Demogus R. Annal. d. post, telegr. et teleph., № 11, 1935.
14. Matthias A. Conl. Yntern. d. Grand Resc. Electr., 1935.
15. Artim M. Energ. Electr, № 7—8, 1939.
16. Туроверов К. С. К вопросу анализа существующих способов вычисления гололедных и ветровых нагрузок. Мет. и гидр., № 7—8, стр. 57, 1939.
17. Белинкин Я. И., Гальцов А. И., Фомин Н. П., Хргиан А. Х. Обледенение воздушных судов. Изв. Аэрогр. ин-та ГВФ, 1938.
18. Robitsh M. Beitr. z. Phys. d. fr. Atmosph, N—4, 1934.
19. Вейнберг Б. П. К теории образования изморози. Мет. вестн., стр. 116, 1925.
20. Wenstrom. Aero—Digest, № 6, 1936.
21. Молчанов П. А. Сборник работ по обледенению. Гидрометеоздат, 1938.
22. Гемфрис Б. Физика воздуха. ОНТИ, 1936.
23. Schinze G. Das Wetter N—4, 1932.
24. Samuels L. T. Bull. Amer. Met. Sos., № 2, 1933.
25. Гапонов Б. С. Температурные границы оседания гололеда и изморози из переохлажденного тумана. Изв. АН, стр. 205, 1939.
26. Andrus C. G. Month. Weath. Rev., № 1, 1930.
27. Альтберг В. Я. О центрах или ядрах кристаллизации воды, № 3, стр. 3, 1938.
28. Таманн G/n Büchner A. Ztsch. f. anorg. Chem., s. 371, 1935.
29. Балабуев А. Г. и Бургсдорф В. В. Некоторые вопросы борьбы с гололедом. Отчет ТНИСГЭИ, 1937.
30. Муретов Н. С. Гололед и изморозь в районе железных дорог. Трансжелдориздат, 1935.
31. ВВС Mitt, № 12, 1935.
32. Kostzold V. ETZ, N—1, 2, 1937.
33. Баракан П. Б. Об одной возможной причине обледенения воздушных судов. Мет. и гидр., № 10—11, стр. 188, 1939.
34. Elektriz wirtsch., III, № 428, 1927.
35. Кицин М. Д. Прибор для определения электрических зарядов по видоизмененному методу Уэльса и Герке. Мет. и гидр., № 6, стр. 61, 1941.

К ВОПРОСУ О ФИЗИКО-МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ГОЛОЛЕДА

Обзор современной литературы

А. Зависимость образования гололеда от различных метеорологических элементов. В последние годы наиболее детально была изучена зависимость образования гололеда от температуры воздуха. Эта зависимость изучалась с 1930 г. на научно-исследовательских станциях НКПС и на всех тех станциях, где велись наблюдения над гололедом. Для нахождения взаимосвязи между началом процесса гололедообразования и температурой, проводилось измерение температуры в момент появления гололеда. В дальнейшем различные авторы произвели статистическую обработку полученного материала, но получили расходящиеся между собой результаты.

Если по отношению к верхней температурной границе больших расхождений не наблюдалось, так как гололед очень редко начинает образовываться на $0,1-0,2^\circ$ выше 0° , то по отношению к нижней границе установлены значительные расхождения.

Гапонов [1], обработав данные наблюдений Одесской обсерватории, установил, что гололед образуется до температуры $-2,2^\circ$. Он же, обработав данные Ринка, полученные на Шнеекоппе,¹ получил для нижней границы температуру в $-3,2^\circ$.

В „Климатическом описании Западной пограничной полосы“ [2] устанавливается, что 89,7% случаев образования гололеда приходится на температуру от $-1,4$ до $-2,5^\circ$.

Воронцов [3] считает, что обледенения наблюдаются чаще всего до $-4,0^\circ$.

Муретов [4] на основании данных наблюдения, полученных на метеорологических станциях, дает нижнюю температуру образования гололеда в $-5,0^\circ$.

Абрамович [5] считает, что 90% всех случаев образования гололеда падает на температурную область, ограниченную снизу температурой в -6° .

Бургсдорф на основании записи самописцев, установленных в горных районах, и опытов лабораторного получения гололеда считает, что ниже -6° гололед образоваться не может.

Таким образом можно считать, что нижняя температурная граница образования гололеда лежит около -5° или -6° , так как эти величины являются средними статистическими сетевых наблюдений.

В виду того, что гололед образуется из переохлажденной воды, то представляется интересным определить насколько данные о температуре образования гололеда могут характеризовать температуры образования переохлажденной воды. Имея в виду, что наблюдения, которыми пользовался Гапонов, были произведены в Одесской обсерватории на берегу моря можно думать, что они не вполне характеризуют температуру, при которой происходило образование переохлажденной воды. Граница инверсии в среднем могла проходить над Одессой на такой

¹ Горная обсерватория в Германии на горе одноименного названия.

высоте, на которой температура, измеренная на высоте 2 м, заметно отличается от температуры на границе инверсии.

Поэтому данные Бургсдорфа, полученные на горах, являются наиболее ценными для определения температуры образования переохлажденной воды, так как в горах температуры образования воды и гололеда не могут сильно отличаться друг от друга из-за непосредственной близости между собой.

Многочисленными наблюдениями установлено, что при образовании гололеда замечается повышение относительной влажности воздуха (Муретов [6]). В литературе нет, однако, до сих пор данных по обработке наблюдений над влажностью при образовании гололеда, и различные авторы ограничиваются только словесным утверждением высказанного положения.

Отдельные авторы приводят также расходящиеся между собой данные о скорости ветра в момент появления гололеда.¹

Абрамович считает, что 68% случаев гололеда приходится на скорость ветра до 8 м/сек, а 95% — до 15 м/сек.

Туроверов [7] на основании наблюдений на Ново-Пятигорской станции считает, что наибольшее число случаев гололеда приходится на скорость ветра от 3 до 8 м/сек.

В „Климатическом описании Западной пограничной полосы“ указывается, что гололеды при скоростях ветра выше 9 м/сек., бывают в очень редких случаях.

В нормах для расчетов воздушных линий связи и электропередач принимается максимальная скорость ветра при гололеде в 20 м/сек.

Направление ветра при гололеде является для Европейской территории СССР довольно постоянным.

Еще Мультиановский [8] на основании своих теоретических положений показал, что ветер при гололеде чаще всего должен быть восточного направления.

Муретов указывает, что 68% всех случаев гололеда приходится на направления ветра SE, E и NE.

Абрамович считает, что 76% всех случаев гололеда сопровождается восточными и южными ветрами.

В „Климатическом описании Западной пограничной полосы“ за преобладающее направление ветра принимается SE (36,6%) и показывается, что 71,7% гололедов сопровождается ветрами трех направлений: E, SE и S.

Ряд авторов утверждает, что перед образованием гололеда обычно наблюдается туман, морось, или переохлажденный дождь, но только у Абрамович приведена статистическая таблица соответствующей обработки. Из этой таблицы видно, что 82% случаев образования гололеда предшествовало появление тумана, мороси или выпадение переохлажденного дождя.

Приведенные данные показывают, что в настоящее время собрано уже достаточно материала по значениям метеорологических элементов во время появления гололеда. Средние статистические величины, полученные разными исследователями, в общем, довольно близки друг к другу. Таким образом можно считать, что этот первый этап обработки материала принес сейчас уже совершенно определенные выводы, которые в дальнейшем могут быть только несколько уточнены.

Отрицательной чертой в этой обработке является то, что обработаны данные метеорологических элементов только во время гололеда, без учета средних климатических значений этих элементов по каждой станции. Вместе с тем такое сравнение является наиболее ценным, так как только оно может действительно показать насколько отличаются местные условия образования гололеда от обычных погодных условий в данной местности.

Б. Связь условий образования твердых гидrometeorов с правилом фаз Гиббса. Сейчас, на основании самых общих теоретических представлений,

¹ Имеется в виду только сравнение статистических данных, полученных для различных местностей (прим. ред.).

можно считать установленным, что гололед образуется из переохлажденной воды. Следовательно, для того, чтобы теоретически подойти к условиям образования гололеда нужно изучить условия конденсации водяного пара в атмосфере.

Работами Мальмгрена [9], Вегенера [10], Келера [11], Вейнберга [12], Тихомирова [13] и Селезневой [14] было показано, что условия конденсации водяного пара в атмосфере, приводящие к образованию твердых гидрометеоров, нужно рассматривать только с точки зрения правила фаз Гиббса, как наиболее общей закономерности, показывающей направление изменения фазового равновесия.

В работах Мальмгрена, Вегенера и Тихомирова приводится значительный экспериментальный материал, показывающий, что условия образования изморози и инея обуславливаются близостью давления водяного пара к давлению насыщения над водной поверхностью при отрицательных температурах.

Келер и Зейлинген на основании правила фаз построили диаграммы, характеризующие условия образования инея и изморози. Келер пробовал пойти еще дальше. На основании анализа применения своей диаграммы к природным условиям он хотел провести разграничение в условиях образования инея и изморози с точки зрения правила фаз, но сделать этого ему не удалось.

Из указанных работ можно сделать два вывода:

1. Хотя метеорологические условия образования инея и изморози отличаются друг от друга, но термодинамические условия их образования (температура и давление водяного пара) полностью совпадают.

2. Термодинамические условия образования инея и изморози подчиняются, в основном, правилу фаз Гиббса [15].

Поэтому можно предположить, что хотя метеорологические условия образования гололеда и сильно отличаются от метеорологических условий образования инея и изморози, но термодинамические условия их образования могут быть очень близкими.

Условия образования гололеда

Легко видеть, что термодинамические условия образования гололеда не соответствуют теоретическим условиям конденсации водяного пара (с точки зрения однокомпонентной системы правила фаз Гиббса). Однокомпонентная система предполагает, что водяной пар начнет конденсироваться в воду только при 100% относительной влажности, тогда как гололед образуется наиболее часто при более низких значениях относительной влажности.

Такое несоответствие может быть вызвано тремя причинами:

1. Наличием неучтенных факторов, возникающих в процессе образования гололеда.

2. Недостаточностью диаграммы однокомпонентной системы правила фаз для разбора изучаемого явления.

3. Недостаточностью для данного случая классической формулировки правила фаз Гиббса.

Не касаясь в этой статье последних двух причин, попробуем установить те факторы, которые могут вызвать отклонение условий образования гололеда от условий образования переохлажденной воды, для чего рассмотрим, хотя бы схематически, механизм процесса образования гололеда.

Фронтальный гололед образуется, как показала Абрамович, при выносе теплого воздуха на сильно охлажденную поверхность. Иными словами гололед образуется при наличии теплого фронта или фронта окклюзии по типу теплого фронта. При контакте теплой и холодной воздушной массы в области теплого фронта наблюдается значительное повышение относительной влажности воздуха, приводящее к конденсации водяного пара с образованием тумана, мороси или выпадению дождя в переохлажденном состоянии при отрицательных температурах.

Если бы наши измерительные приборы—термометр, психрометр и гололедный станок находились в области конденсации водяного пара, то мы могли бы наблюдать гололед, условия образования которого ничем не отличались бы от условий образования переохлажденной воды. Такое соответствие мы можем ждать там, где гололед образуется в той же части воздушной массы, где происходит одновременное образование капель переохлажденной воды. Но так как наши приборы расположены на высоте 2 м, то, естественно, что все то, что мы наблюдаем на этой высоте, несколько отличается от того, что происходит на границе инверсии.

Капелька переохлажденной воды, образовавшаяся на границе инверсии под влиянием собственного веса, начинает так или иначе падать вниз, что приводит ее в холодную массу воздуха. Здесь, столкнувшись с каким-нибудь препятствием, она вызовет образование гололеда.

При падении капли вниз, с одной стороны, увеличится степень ее переохлаждения, так как она будет окружена теперь воздушной массой с более низкой температурой. С другой стороны, капелька будет находиться при меньшей относительной влажности, вследствие того, что холодная масса воздуха имеет меньшую относительную влажность воздуха по сравнению с той влажностью, которая наблюдается в области теплого фронта.

Чем дальше от точки соприкосновения с землей, некоторой мысленной поверхности характеризующей теплый фронт, будет наблюдаться образование гололеда внутри холодной массы воздуха, тем более низкой температурой и пониженной относительной влажностью он будет сопровождаться¹. Здесь большее значение будет приобретать расстояние от границы инверсии.

Ввиду того, что средняя статистическая высота границы инверсии при гололеде (по Абрамович) довольно постоянна, то можно думать, что изменение термодинамических условий образования гололеда лежит в достаточно узких пределах и отклонения их значений от этих пределов обуславливаются уже какими-то вторичными причинами.

Чем дальше от теплого фронта находится та точка, в которой было замечено образование гололеда, тем большая скорость ветра в ней наблюдается. Это объясняется тем, что в холодной массе перед теплым фронтом скорость ветра всегда несколько больше, чем у самого фронта.

Описанная схема образования гололеда дает возможность связать условие его образования из переохлажденной воды с условиями конденсации водяного пара в переохлажденную воду. При такой, либо другой схеме становится трудным объяснить, почему довольно значительное число случаев образования гололеда приходится на сравнительно низкую относительную влажность.

Исходя из приведенной схемы образования гололеда, можно сделать следующие выводы:

1. Образованию гололеда предшествует образование тумана, мороси или выпадение дождя при отрицательных температурах.
2. Чем дальше в холодной массе воздуха от теплого фронта наблюдается появление гололеда, тем больше условия его образования должны отличаться от условия появления переохлажденной воды на границе инверсии.
3. Условия образования гололеда должны лежать в достаточно узких пределах.
4. Понижение относительной влажности при образовании гололеда сопровождается увеличением скорости ветра.

¹ Если гололед будет обнаружен еще дальше, по горизонтали от теплого фронта, то это расстояние уже не будет играть заметной роли в изменении термодинамических условий его образования.

Экспериментальная проверка высказанных положений

Для проверки высказанных положений была проведена обработка архива Главной геофизической обсерватории по инструментальным наблюдениям над гололедом за 1940—1945 гг.

Прежде всего были изучены температуры образования гололеда. Результаты обработки сведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость появления гололеда от температуры

Температура	Число случаев	
	абсолютное	процент к общему числу
0°	12	4,0
0—2°	126	43,0
—2—4°	83	28,8
—4—6°	43	14,9
—6°	24	8,3

Из табл. 1 видно, что 87,4% всех случаев образования гололеда наблюдается в интервале от 0 до —6°.

Эта таблица еще раз подтверждает, что за нижнюю температурную границу образования гололеда можно принять температуру в —6°.

Была проведена так же обработка архива для определения числа случаев образования гололеда, приходящихся на различные значения относительной влажности воздуха. При этом одновременно определялась скорость ветра в момент появления гололеда и бралось ее среднее значение внутри каждого интервала относительной влажности.

Таблица 2

Зависимость образования гололеда от относительной влажности и скорости ветра в момент появления гололеда

Относительная влажность	Средняя скорость ветра	Число штителей	Число случаев	
			абсолютное	процент к общему числу
100—98	2,8	8	92	32,2
98—96	3,6	4	63	22,1
96—94	6,7	4	50	17,5
94—92	6,6	3	34	11,9
92	9,5		46	16,1

Из табл. 2 видно, что 71,9% всех случаев образования гололеда приходится на относительную влажность, лежащую в пределах 100—94%, т. е. в пределах не больше чем на 6%, отличающихся от теоретических условий образования переохлажденной воды. Это отклонение может быть вызвано недостаточной точностью измерения влажности при отрицательных температурах психрометром, кроме того оно вызывается так же и изменением относительной влажности при переносе капли, с границы инверсии в холодную массу воздуха, имеющую меньшую относительную влажность.

Общее повышение средней скорости ветра при понижении относительной влажности в момент появления гололеда подтверждает ранее высказанные положения.

На основании сравнения табл. 1 и 2 мы можем сделать вывод, что наибольшее число случаев образования гололеда лежит при температуре от 0 до -6° и относительной влажности от 100 до 98%.

Для подтверждения найденной зависимости были обработаны „Таблицы для записи метеорологических элементов“ (ТМ-1) по трем станциям, две из которых являются сильно гололедными (Ново-Пятигорск и Дебальцево), а на третьей (Артемовск) гололед почти не наблюдается. При обработке определялся вид твердых гидрометеоров, которые наблюдались при температуре от 0 до -6° и относительной влажности от 100 до 98% (табл. 3).

Таблица 3

Повторяемость (в процентах) твердых гидрометеоров при температуре от 0 до -6° и относительной влажности от 100 до 98%

Вид гидрометеоров	Ново-Пятигорск 1939—1940 гг. 289 сроков	Дебальцево 1938—1940 гг. 385 сроков	Артемовск 1939—1940 гг. 78 сроков
Гололед	67,1	42,2	2,5
Изморозь	8,6	25,2	7,5
Иней	7,2	1,3	6,7
Снегопад	3,8	7,2	30,7
Снежный покров	8,6	15,0	20,5
Отсутствие гидрометеоров	4,4	8,5	32,8

Из табл. 3 можно сделать следующие выводы:

1. Сильно гололедные станции отличаются большим количеством сроков, во время которых температура и влажность были в указанных выше пределах.

2. При указанных условиях на сильно гололедных станциях гололед образовывался в большем числе случаев, чем все другие твердые гидрометеоры.

3. Если при выбранных условиях гололед не отмечался, то отмечались другие твердые гидрометеоры. Так как мы знаем, что давление насыщенных водяных паров над жидкой поверхностью больше, чем над твердой поверхностью, то при наличии твердых гидрометеоров происходит непрерывная перегонка образующейся переохлажденной воды на твердую фазу. Ввиду того, что скорость этой перегонки возрастает с понижением температуры, то (по расчетам Финдейзена) при температуре -6° практически вся переохлажденная вода перегонится на твердую фазу в очень короткий промежуток времени. Если переохлажденной воды образовалось мало, то при наличии твердых гидрометеоров и низкой температуры она раньше перегонится на твердую фазу, чем приведет к образованию гололеда при кристаллизации. Только тогда, когда она образуется в значительных количествах, то, одновременно с перегонкой, может так же привести и к образованию гололеда.

По тем же станциям была проведена аналогичная обработка для жидких гидрометеоров. В табл. 4 даются результаты этой обработки, причем тогда, когда жидкие гидрометеоры не были отмечены на станции, то нами учитывались и твердые гидрометеоры.

Из табл. 4 видно, что в огромном большинстве случаев, особенно для сильно гололедных станций, при наличии температуры и относительной влажности в указанных пределах наблюдается образование тумана.

После сравнения табл. 3 и 4 можно сделать вывод, — пока только для Ново-Пятигорска и Дебальцева, — что там, при наличии указанных термодинамических условий, в большинстве случаев идет образование тумана, приводящего к появлению гололеда.

Остается изучить вопрос о появлении гололеда при других термодинамических условиях. Результат соответствующей обработки приведен в табл. 5.

10404

Таблица 4

Повторяемость (в процентах) гидрометеоров при температуре от 0 до -6°
и относительной влажности от 100 до 98%

Вид гидрометеора	Ново-Пятигорск 1939—1940 гг. 289 сроков	Дебальцево 1938—1940 гг. 385 сроков	Артемовск 1939—1940 гг. 75 сроков
Туман	60,2	77,8	34,6
Морось	9,3	2,2	6,4
Дождь	0,3	0,6	—
Снегопад	9,3	2,2	23,0
Снежный покров	7,6	5,6	11,8
Гололед	7,5	5,6	—
Изморозь	—	2,2	1,1
Иней	1,6	0,7	5,1
Отсутствие гидрометеоров	4,5	3,1	18,0

Таблица 5

Определение условий образования твердых гидрометеоров
(число случаев)

Температура, °С		Относительная влажность	Станция	Гололед	Изморозь	Иней	Снег	Снежный покров	Отсутствие гидромет.	Всего
от	до									
0	> 0	100—94	Ново-Пятигорск	5	—	1	5	92	66	169
			Дебальцево	4	6	—	1	43	117	171
			Артемовск	2	—	10	3	28	91	132
			Астрахань	—	—	3	7	16	73	101
0	— 6	100—94	Ново-Пятигорск	135	19	9	11	128	52	354
			Дебальцево	162	97	7	28	58	33	385
			Артемовск	7	20	7	19	20	19	96
			Астрахань	1	2	11	9	4	64	91
-6,1	— 13	100—94	Ново-Пятигорск	43	4	2	1	29	14	93
			Дебальцево	24	40	—	1	26	11	102
			Артемовск	—	2	—	4	5	3	14
			Астрахань	—	—	4	1	8	9	22
0	> 0	93—87	Ново-Пятигорск	1	1	4	—	42	72	120
			Дебальцево	—	1	1	—	4	44	50
			Артемовск	2	—	4	7	32	98	159
			Астрахань	—	—	7	5	12	113	137
0	— 6	93—87	Ново-Пятигорск	41	3	18	4	47	29	142
			Дебальцево	—	—	—	—	—	—	—
			Артемовск	3	5	18	27	22	21	96
			Астрахань	—	—	20	14	4	98	140
-6,1	— 13	93—87	Ново-Пятигорск	25	5	1	4	30	13	78
			Дебальцево	—	3	—	2	8	6	19
			Артемовск	—	1	—	17	26	5	49
			Астрахань	—	—	20	3	7	41	71
0	> 0	86—80	Ново-Пятигорск	1	—	5	—	19	58	63
			Дебальцево	1	—	—	—	3	29	33
			Артемовск	1	—	4	—	17	86	109
			Астрахань	—	—	5	4	6	69	84
0	— 6	86—80	Ново-Пятигорск	9	1	4	0	6	16	36
			Дебальцево	—	—	—	—	—	1	1
			Артемовск	—	3	16	2	1	26	48
			Астрахань	—	—	9	4	3	51	67
-6,1	— 13	86—80	Ново-Пятигорск	14	—	3	—	8	7	32
			Дебальцево	—	—	—	1	2	1	4
			Артемовск	—	2	2	11	23	1	39
			Астрахань	—	—	4	6	16	17	47

Табл. 5 еще раз показывает правильность выбранных нами условий образования гололеда.

На основании всей проведенной обработки видно, что условия образования гололеда сравнительно мало отличаются от тех условий при образовании воды, которые определяются однокомпонентной системой правила фаз Гиббса.

Если переохлажденная вода образуется при 100% относительной влажности воздуха, то гололед образуется из нее при относительной влажности 100—94%. Небольшое понижение влажности при этом обуславливается как неточностью ее определения, так и тем, что гололед образуется не в той же точке, где шло образование воды. Перенос капли воды с границы инверсии (либо ее появления) к поверхности земли (место образования гололеда) приводит к тому, что у поверхности земли, во время образования гололеда относительная влажность имеет меньшее значение, чем на границе инверсии. Однако это понижение влажности не настолько велико, чтобы вызвать испарение капли до образования гололеда.

Приведенный анализ наблюдений может служить основой одного из методов определения вертикальной мощности гололедообразующего слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапонов. Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. наук, № 2, 1939.
2. Климатическое описание Западной пограничной полосы. ГГО, 1933.
3. Воронцов. Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. наук, № 3, 1940.
4. Муретов. Гололедные образования на воздушных линиях связи и электропроводах. Гидрометеиздат, 1945.
5. Абрамович. Условия образования гололеда на Европейской территории Союза. Гидрометеиздат, 1944.
6. Муретов. Изд. Всес. бюро по высоковольтным передачам. 1932.
7. Туроверов. Организация и работа опытной гололедной станции в Ново-Пятигорске. 1933.
8. Мультановский. Мет. вест., № 11, 1925.
9. Malmgren. Met. ZS. XLVII, 1912.
10. Wegener. Met. ZS. XLV, 1910.
11. Koehler. Geof. Publ. Vol. 2. № 1, 1921.
12. Вейнберг. Сб. работ по исслед. условий обледенения. 1937.
13. Тихомиров. Мет. вест., № 9—12, 1931.
14. Селезнева. Сб. работ по исслед. условий обледенения. 1937.
15. Финдлей. Правило фаз. 1935.

ОТЛОЖЕНИЕ ИЗМОРОЗИ НА ПРОВОДАХ В СВЯЗИ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Введение

На Бугульминской гидрометеорологической гололедной станции в течение зимнего периода отмечается большое количество случаев изморози. Состояние погоды при этом обычно ясное, со слабыми ветрами. Нередко наблюдается штиль. Такие условия характерны для образования инея.

В руководстве метеорологическим станциям II разряда указывается, что „иней... осадок, появляющийся обыкновенно ночью, ... на поверхности земли и на земных предметах (преимущественно на горизонтальных поверхностях) из соприкасающегося с ними слоя воздуха...“

Несколько ниже говорится, „... наиболее обильное осаждение инея наблюдается на траве, на листьях кустарников и деревьев“. Сравнивая провода с листьями деревьев, что кажется допустимым благодаря их малой массе, большинство случаев отложений на проводах по Бугульме следовало бы отнести не к изморози, а к инею, тем более, что при этом наблюдается значительный осадок на горизонтальных поверхностях, на снегу, на крышах будок и т. п.

Относительно изморози руководство указывает, что „это... осадок кристаллического¹ строения, оседающий преимущественно на ветвях деревьев и кустарников, на хвое, на телеграфных и телефонных проводах... в туманную морозную погоду при штиле или слабых ветрах, а также и при сильных морозах, когда в воздухе плавают ледяные иглы. Изморозь образуется в виде бахромы из игл, напоминающих колючую проволоку, щетки, веточки и т. п. И далее: „слой изморози нарастает преимущественно с наветренной стороны предмета...“

Одностороннее в виде бахромы с наветренной стороны расположение на проводах и ветвях в Бугульме позволяет отнести указанные случаи к изморози. Однако следует отметить, что иногда ни тумана, ни ледяных игл в воздухе во время отложения не наблюдают.

Подходя с генетической точки зрения, инеем, в соответствии с руководством, следовало бы называть такой осадок, который сублимируется из воздуха, близкого к состоянию насыщения, на предметах, охлажденных излучением ниже точки росы (кристаллизация — при отрицательных температурах).

Изморозью следовало бы называть отложение, выделяющееся из перенасыщенного паром воздуха, (также при наличии капельно-жидкого переохлажденного тумана) при соприкосновении его с твердым телом. Температура последнего не должна значительно превышать температуру воздуха, хотя и может быть выше ее. В этом существенное различие обоих процессов.

¹ Изморозь, осаждающаяся из капельно-жидкого тумана, состоит не из кристалликов, а из намерзших друг на друга капелек. А. Д.

Переохлаждение воздуха может возникать либо во всей толще атмосферы в результате макропроцессов, либо в приземном тонком слое в результате местного радиационного выхолаживания.

Практически наблюдателю отличить иней на проводах от изморози местного радиационного происхождения будет достаточно сложно. Правда, при перенасыщении состояния атмосферы можно ожидать образования в воздухе ледяных кристаллов, возникающих на ядрах сублимации. Но при малых перенасыщениях, при чистом воздухе и небольшой толщине переохлажденного приземного слоя воздуха ледяные кристаллы могут не появиться или возникнуть в столь малом количестве, что не будут отмечены наблюдателем.

Практически для климатологии и синоптики, повидимому, больший интерес представляло бы отделение случаев выхолаживания под влиянием подстилающей поверхности тонкого нижнего слоя воздуха от процессов, захватывающих всю толщу атмосферы.

При специальных исследованиях интересно различать случаи, когда в приземном слое воздух близок к состоянию насыщения и когда он перенасыщен водяным паром.

Производственника-электрика интересует только факт появления отложения на проводах, величина и плотность осадка, но отнюдь не его генезис.

На основании изложенного кажется целесообразным объединить все виды отложений рыхлой тонкой структуры на проводах под каким-либо одним общим термином, хотя бы „морозь“, с последующим уточнением происхождения осадка (местного радиационного или макросиноптического происхождения).

Отложение, возникающее в результате намерзания друг на друге мелких капелек можно назвать „наморозью“, а связанное с сублимацией пара — „сублиматом“. Если сузить понятие „изморози“, исключая из него наморозь, то оба явления — иней и изморозь — объединятся термином „сублимат“.

Не касаясь пока новой терминологии и не затрагивая вопроса о правильности отнесения в соответствии с руководством того или иного осадка к изморози, рассмотрим сначала условия, при которых наблюдались отложения в Бугульме, а затем коснемся некоторых общих закономерностей.

Влияние теплового воздействия подстилающей поверхности

Проследим характер теплового взаимодействия подстилающей поверхности и воздуха. Для этой цели проанализируем суточный ход разности между температурой T_2 воздуха на высоте 2 м (в будке) и температурой T_0 (близ поверхности снега) и сопоставим момент, когда разность $T_2 - T_0$ переходит через нуль, становясь положительной, с моментом τ_v появления изморози.

В рассмотрении вошли все случаи изморози, имевшие место за осенне-зимний

Таблица 1

Распределение числа случаев (в процентах) появления изморози

$T_2 - T_0 < 0$ (перехода через нуль нет)	Переход наступает после следующего за τ_v синоптического срока	$T_2 - T_0 > 0$ наблюдалась в ближайший к τ_v синоптический срок, причем изморозь появилась:		Изморозь появилась после перехода спустя:		Нет сведений о температуре почвы
		до срока перехода	после срока перехода $T_2 - T_0$ через нуль	6 — 12 час.	больше чем 12 час.	
18,75	5	30	15	20	5	6,25

период 1941/1942 г. в общем количестве 80 (с 15/X 1941 г. по 25/II 1942 г.). Данные о температуре почвы мы имели возможность получить только за основные

синоптические сроки. В табл. 1 дано распределение числа всех случаев изморози по времени ее наступления сравнительно с моментом перехода $T_2 - T_0$ через нуль.

Судя по суточному ходу температуры воздуха, в последних неопределенных случаях (столбец 7) и по вечернему (16—17 час.) времени появления изморози можно предположить, что там также должно наблюдаться близкое совпадение моментов появления изморози и перехода разности $T_2 - T_0$ через нуль.

В первом случае (столбец 1), если бы проводились более частые точные наблюдения за температурами, то возможно, что в ряде случаев были бы обнаружены $T_2 - T_0 > 0$.

Но даже сопоставляя число случаев, когда разность $T_2 - T_0 < 0$ наблюдалась все время (или сохранялась вплоть до последующего за моментом образования изморози синоптического срока), с числом случаев, когда время перехода $T_2 - T_0$ через нуль опережает или оказывается близким к моменту τ_v появления изморози, получим в первом случае 23,75%, во втором 70% (или 76,25%, если отнести сюда и случаи без данных о температуре почвы).

В случаях, вошедших в столбец 3, следует ожидать большего или меньшего запаздывания момента τ_v относительно момента перехода $T_2 - T_0$ через нуль, что могло бы быть константировано регистрированием или более частыми измерениями температуры. Указанная закономерность может нарушаться, когда на температуру воздуха оказывают заметное, сравнительно с воздействием почвы, влияние другие факторы, как, например: адвекция, радиационное выхолаживание самого воздуха (когда дизергенция лучистого потока значительно больше нуля) и т. п.

Отбрасывая 41 случай с неизмерявшимся малым осадком и 5 случаев без данных о температуре почвы, имеем следующее распределение оставшихся 34 случаев (табл. 2).

Таблица 2

Распределение числа случаев (в процентах) появления изморози

$T_2 - T_0 < 0$	Переход через нуль наступает после следующего за τ_v синоптического срока	$T_2 - T_0 > 0$ наблюдалась в ближайший к τ_v синоптический срок, причем изморозь появилась:		Иморозь появилась после возникновения $T_2 - T_0 \geq 0$ через:	
		до срока перехода	после срока перехода $T_2 - T_0$	6—12 час.	больше чем 12 час.
		через нуль			
11,8	2,9	50,0	14,7	17,7	2,9

Отсюда еще более наглядно следует, что большей частью образование изморози связано с переходом $T_2 - T_0$ через нуль: изморозь опередила или не сопровождалась переохлаждением почвы только в 14,7%; в 85,8% случаев изморозь появилась приблизительно одновременно или позже возникновения $T_2 - T_0 > 0$. Во всех случаях более раннего появления изморози и полного отсутствия переохлаждения почвы наблюдалась сплошная нижняя облачность, уменьшавшая величину эффективного излучения и выдвигавшая на первое место динамические причины. Чаще всего наблюдается близкое совпадение обоих моментов. Как значительное запаздывание, так и значительно более раннее появление изморози встречается реже, причем чаще наблюдается значительное запаздывание (20,6%), нежели значительное опережение или непоявление изморози (14,7%).

Из рассмотренных 34 случаев были отобраны 19, когда наблюдалось близкое совпадение времени появления изморози и времени вечернего возникновения $T_2 - T_0 > 0$. Средние температуры для этой выборки представлены в табл. 3.

Как легко видеть, перед образованием изморози радиационного происхождения днем, воздух холоднее подстилающей поверхности и, следовательно, может обога-

Таблица 3

Средние температуры за основные синоптические сроки в дни с вечерним появлением изморози

	13 час.	19 час.	11 час.	7 час.
\bar{T}_2	-16,7	-19,2	-19,1	-19,4
\bar{T}_0	-14,7	-21,5	-21,2	-21,6
$T_2 - T_0 = \Delta \bar{T}$	-2,0	+2,26	+2,12	+2,15

щаться водяным паром за счет испарения снега. К времени образования изморози температура почвы опускается ниже температуры воздуха—происходит его выхолаживание и, повидимому, повышение относительной влажности.

Разность между температурой поверхности снега и воздуха мало меняется в течение ночи, колеблясь около +2,1 +2,30.

В момент начала образования отложения (для рассмотренных случаев) на высоте 15 м средняя температура $T_{15 м} = -17,9^\circ$, в психрометрической будке (высота 2 м) $T_{2 м} = -18,4$, что подтверждает наличие выхолаживающего влияния подстилающей поверхности при изморозеобразовании.

Из 19 случаев—в 13 (69%) отсутствовала облачность (%), в 1 (5%) была облачность 1/1 Sc, в 1 (5%)—10/10 ≡, в 3 (16%)—10/0 Ac, Cs, в 1 (5%)—10/10 Frst, т. е. 74% характеризовалось облачностью 0/0—1/1, 16%—10/0 (облака верхнего или среднего яруса) и 10% с облачностью 10/10, из которых один сопровождался туманом у земли.

Таким образом в условиях Бугульмы большая часть случаев изморози связана с радиационным выхолаживанием приземных слоев воздуха. Этим обуславливается преимущественное появление „изморози“ в вечерние и ночные часы.

В явления „изморози“, повидимому, включены и отложения инея, если понимать под последним осадок, появляющийся с вечера или ночью при ясном небе и спокойной погоде из чистого прозрачного воздуха.

В качестве примера приводим один из таких случаев 28/1 1942 г. „Изморозь“ появлялась в 17 час. 30 мин. Температура воздуха при начале отложения $-17,1^\circ$; в конце $-18,3^\circ$. Безоблачно. Штиль. Разность между температурой воздуха в будке и около почвы $T_2 - T_0$ в 13 час. $+0,4^\circ$, в 19 час. $+0,9^\circ$, в 12 час. $+4,8^\circ$, в 7 час. $+2,4^\circ$. На проводах 10 и 15-метровой вышки очень слабое отложение. На высоте 2 м большой диаметр $\bar{D} = 11$ мм, малый $\bar{d} = 10$ мм. На высоте 6 м $\bar{D} = 8$ мм, $\bar{d} = 7$ мм. Форма элементов—плоские пластинки.

Выхолаживающее влияние почвы близ момента появления осадка очевидно. Хорошо выражено убывание величины отложения с высотой.

Отделение случаев с инеем от случаев изморози (в суженном понимании) местного радиационного происхождения и исключение их из рассмотрения, не говоря о его сложности в отдельных случаях, вряд ли практически целесообразно; осадок на проводах, независимо от того из перенасыщенного или перенасыщенного воздуха он возникал, будет одинаково ухудшать работу линий электросвязи, при равной величине отложения. Отсюда следует, что, говоря об осаднении твердых гидрометеоров на проводах, целесообразно учитывать все виды отложений. Тогда термин „изморозь“ уже оказывается неприменимым даже не в суженном его понимании. Здесь удобнее воспользоваться понятием „морозь“, а если желательно включить также явления гололеда, то — „гололедообразование“.

Нужно отметить, что в темную половину суток тепловой баланс почвы отрицателен и разности $T_2 - T_0$ должны быть, как правило, больше нуля, изморозь же возникает не всегда, так как на выхолаживающее воздействие почвы накладывается влияние других факторов.

Влияние влажности воздуха

Введем в рассмотрение влажность воздуха. Положим, что:

1. Передача пара и температуры в воздухе подчиняется уравнению

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2},$$

где ρ — плотность пара, D — коэффициент диффузии.

2. Коэффициент диффузии D (или коэффициент турбулентности) не зависит от высоты¹.

3. В воздухе возможно перенасыщенное состояние пара, причем конденсация не происходит.

В случае изменяющихся с течением времени граничных условий $\rho_{z=0} = \rho_{0,\tau}$ и при начальных условиях $\rho_{z,\tau=0} = \rho'_{z,0} - C = 0$ при $z > 0$ имеем

$$\rho = \rho' + C = \frac{z}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^\tau (\rho_{\tau-x,0} - C) \frac{e^{-\frac{z^2}{4D\tau}}}{x^{3/2}} dx + C. \quad (1)$$

Если

$$\rho_{\tau-x,0} = \rho_{0,0} = \text{const},$$

то

$$\rho = (\rho_{0,0} - C) \left[1 - \Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] + C$$

или

$$\rho = \rho_{0,0} + (C + \rho_{0,0}) \Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right), \quad (2)$$

где

$$\Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) = \frac{z}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{2\sqrt{D\tau}}} e^{-x^2} dx.$$

Для вычисления по формуле (1) необходимо иметь закон изменения температуры почвы $T_{0,\tau}$ со временем (а следовательно, и $\rho_{0,\tau}$). Так как последний не известен, то мы воспользуемся формулой (2), характеризующей предельный случай с резким скачком вначале почвенной температуры до значения $T_{0,\tau} = T_{0,0} = \text{const}$. Вычисления по формуле (2) технически значительно проще, чем по формуле (1). Итак, полагая, что в начале процесса выхолаживания воздух был изотропичен с температурой C_T и плотностью пара O_w , а температура почвы была $T_{0,0}$ и мак-

¹ Это ограничение, налагаемое на коэффициент диффузии, от которого в дальнейшем следует отказаться, не меняет основных выводов автора (прим. ред.).

симплярная возможная плотность пара у нее $\rho_{0,0}$, проанализируем, как должна изменяться относительная влажность r воздуха на высоте z

$$r = \frac{\rho_w}{\rho_{w, \max}} = \frac{\rho}{\rho_{\max}} = \frac{\rho_{0,0} + (C_w - \rho_{0,0}) \cdot \Phi_w}{\rho_{\max} [T_{0,0} + (C_T - T_{0,0}) \cdot \Phi]}, \quad (3)$$

где

$$\Phi = \Phi \left(\frac{z}{2 \sqrt{D \tau}} \right),$$

$$\Phi_w = \Phi \left(\frac{z}{2 \sqrt{D_w \tau}} \right).$$

Отсюда находим

$$\frac{\partial r}{\partial \tau} = \frac{\frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot \rho_{\max} - \rho \frac{\partial \rho_{\max}}{\partial \tau}}{\rho_{\max}^2} =$$

$$= \frac{(C_w - \rho_{0,0}) \frac{\partial \Phi_w}{\partial \tau} \rho_{\max} - [\rho_{0,0} + (C_w - \rho_{0,0}) \Phi_w] \frac{\partial \rho_{\max}}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}}{\rho_{\max}^2}$$

или

$$\frac{\partial r}{\partial \tau} = \frac{\frac{\partial \Phi_w}{\partial \tau} - \left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + \Phi_w \right] \frac{1}{\rho_{\max}} \frac{\partial \rho_{\max}}{\partial T} (C_T - T_{0,0}) \frac{\partial \Phi}{\partial \tau}}{\rho_{\max}} (C_w - \rho_{0,0}) =$$

$$= \frac{C_w - \rho_{0,0}}{\rho_{\max}} \varphi. \quad (4)$$

Считая почву выхолаживающим агентом, имеем $C_T > T_{0,0}$ и $C_w > \rho_{0,0}$, но $\rho_{\max} > 0$. Следовательно, направление изменения r зависит от знака φ . При $\varphi > 0$ относительная влажность растет, при $\varphi < 0 \dots \frac{\partial r}{\partial \tau} < 0$.

Так как

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = - \frac{z}{2 \sqrt{\pi D}} \cdot \tau^{-\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4 D \tau}} \leq 0,$$

то

$$\varphi = \left\{ \left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + \Phi_w \right] \cdot \frac{1}{\rho_{\max}} \cdot \frac{\partial \rho_{\max}}{\partial T} (C_T - T_{0,0}) \cdot \frac{e^{-\frac{z^2}{4 D \tau}}}{\sqrt{D}} - \frac{e^{-\frac{z^2}{4 D_w \tau}}}{\sqrt{D_w}} \right\} \times$$

$$\times \frac{z \cdot \tau^{-\frac{3}{2}}}{2 \sqrt{\pi}}$$

при $\tau = 0$ и $\tau = \infty \dots \varphi = 0$ и, следовательно $r \rightarrow \text{const}$.

Кроме того, так как

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \tau^2} = -\frac{z}{2\sqrt{\pi D}} \cdot \tau^{-\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4D\tau}} \left(\frac{z^2}{4D\tau} - \frac{3}{2\tau} \right)$$

обращается в нуль при $\tau = \frac{z^2}{6D}$, то Φ достигает при этом экстремума. Обозначая $\frac{z}{2\sqrt{D}} = h$, имеем

$$\frac{\partial^3 \Phi}{\partial \tau^3} = -\frac{h}{\sqrt{\pi}} \tau^{-\frac{7}{2}} \cdot e^{-\frac{h^2}{2}} \left\{ \frac{h^4}{\tau^2} - 5 \frac{h^2}{\tau} + \frac{15}{4} \right\}$$

также обращается в нуль при $\tau = 0$ и $\tau = \infty$.

При $\tau = \frac{2h^2}{3}$

$$\frac{\partial^3 \Phi}{\partial \tau^3} = -\frac{h}{\sqrt{\pi}} \tau^{-\frac{7}{2}} \cdot e^{-\frac{h^2}{2}} \left\{ \left(\frac{3}{2} \right)^2 - 5 \cdot \frac{3}{2} + \frac{15}{4} \right\} = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{\pi}} \tau^{-\frac{7}{2}} \cdot e^{-\frac{3}{2}} > 0.$$

Следовательно, при $\tau = \frac{2h^2}{3} \frac{\partial \Phi}{\partial \tau}$ имеет минимум, а функция $\tau^{-\frac{3}{2}} e^{-\frac{h^2}{2}}$ максимум. Таким образом, если бы имело место неравенство $D_w > D$, то при соответствующей величине коэффициента при положительном экспоненциальном члене в функции φ относительная влажность сначала убывала бы, а затем возрастала, стремясь к 100%.

При $D_w = D$

$$\varphi = \left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + \Phi_w \right] \frac{1}{\rho_{\max}} \cdot \frac{\partial \rho_{\max}}{\partial T} \cdot (C_T - T_{0,0}) - 1 \left\} \frac{e^{-\frac{z^2}{4D\tau}}}{\sqrt{D}} \cdot \frac{z\tau}{2\sqrt{\pi}} \quad (5)$$

Знак величины φ здесь зависит от знака разности в фигурной скобке, каковую обозначим через φ_1 . Полагаем приближенно $\frac{1}{\rho_{\max}} \frac{\partial \rho_{\max}}{\partial T} = 0, 1$, имеем при

$$\left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + \Phi_w \right] (C_T - T_{0,0}) > 10 \quad \frac{\partial r}{\partial \tau} > 0 \quad (6)$$

и при

$$\left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + \Phi_w \right] (C_T - T_{0,0}) < 10 \quad \frac{\partial r}{\partial \tau} < 0.$$

Или, в начале

$$(\Phi_w [\tau = 0] = 1) \frac{\partial r}{\partial \tau} > 0, \text{ если } \frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} > \frac{10}{C_T - T_{0,0}} - 1, \quad (6a)$$

в конце

$$(\Phi_w [\tau = \infty] = 0) \frac{\partial r}{\partial \tau} > 0, \text{ если } \frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} > \frac{10}{C_w - T_{0,0}}. \quad (6b)$$

Если же $D_w < D$, что, повидимому, имеет место в природе при осуществлении радиационной теплопередачи, то сначала (в момент $\tau_1 = \frac{z^2}{6D}$) достигает максимума положительный член функции φ , позже (в момент $\tau_2 = \frac{z^2}{6D_w}$) — отрицатель-

ный. Знак φ зависит от соотношения между их величинами. Так, в момент τ_1

$$\varphi = \left\{ \left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + \Phi_w \right] (C_T - T_{0,0}) 0,1 - \sqrt{\frac{D}{D_w}} \cdot e^{-\frac{3}{2} \frac{D - D_w}{D_w}} \right\} e^{-\frac{3}{2}} \times \\ \times \frac{3}{z^2 2\sqrt{\pi}} \frac{D}{D_w} \quad (7)$$

Как легко видеть, при $D = D_w$ уравнение (7) переходит в (5). Обозначим выражение в фигурной скобке через φ_2

$$\varphi_2 = \left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + \Phi_w \cdot \left(1,225 \sqrt{\frac{D}{D_w}} \right) \right] (C_T - T_{0,0}) 0,1 - \\ - \sqrt{\frac{D}{D_w}} \cdot e^{-\frac{3}{2} \frac{D - D_w}{D_w}} \quad (7a)$$

Переходя к конкретным случаям, рассмотрим:

1. Случай чистой диффузии.

Палагаем: $D = 0,165$, $D_w = 0,195$, $t_{\text{воз}} = -15^\circ$,

$$t_{0,0} = -20,0 \quad \rho = C_w = 1,26 \text{ г/м}^3, \quad \rho_{0,0} = 0,895.$$

Тогда

$$\sqrt{\frac{D}{D_w}} = \sqrt{0,846} = 0,920; \quad \frac{3}{2} \cdot \frac{D - D_w}{D_w} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,030}{0,195} = 0,231,$$

$$e^{-\frac{3}{2} \frac{D - D_w}{D_w}} = 1,26, \quad \frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} = \frac{0,895}{0,365} = 2,45, \quad C_T - T_{0,0} = 5^\circ$$

и для τ_1

$$\varphi_2 = 1,79 - 1,16 > 0.$$

Следовательно, в первый момент влажность должна расти.

Во второй момент $\tau_2 = \frac{z^2}{6D_w}$ аналогично (7) имеем

$$\varphi = \left\{ \left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + \Phi_w \right] (C_T - T_{0,0}) \cdot 0,1 \cdot \sqrt{\frac{D_w}{D}} \cdot e^{-\frac{3}{2} \frac{D_w - D}{D}} - 1 \right\} \times \\ \times e^{-\frac{3}{2}} \frac{3}{z^2 2\sqrt{\pi}} \frac{D_w}{D} \quad (8)$$

и

$$\varphi_2 = \left[\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} + 0,7795 \right] (C_T - T_{0,0}) \cdot 0,1 \sqrt{\frac{D_w}{D}} \cdot e^{-\frac{3}{2} \frac{D_w - D}{D}} - 1. \quad (8a)$$

Подстановка в (8а) числовых значений соответствующих величин опять дает $\varphi_2 > 0$. Таким образом влажность воздуха должна монотонно возрастать, стремясь к 100%. Действительно, вычисления по формуле (2) дали для $z = 2$ м (табл. 4).

Таблица 4

Ход температуры и влажности на высоте 2 м для случая чистой диффузии

τ час.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t (2 м)	-15,0	-15,0	-15,0	-15,1	-15,2	-15,4	-15,5	-15,8	-15,9	-10,0	-16,0
$r\%$	90	90	90	90	90	91	91	92	92	92	92

На высоте 15 м влияние диффузии за период 10 час. не оказывается.

2. Случай чистой диффузии пара и радиационной теплопередачи.

$D_w = 0,195$, $D_r = D_R$, где коэффициент лучистой температуропроводности D_R вычисляем по Бренту (Брент, „Физическая и динамическая метеорология“, стр. 118, 1938 г.)

$$D_R = \frac{139 \cdot T}{60 \rho_{\text{воз}} C_p \rho_w} \frac{\partial E}{\partial T}, \text{ где } \frac{\partial E}{\partial T} = [3,0 + 0,02 \cdot (T - 270) \cdot 10^{-3}], \quad (9)$$

где $\rho_{\text{воз}}$ = плотность воздуха. Итак, принимаем $D_w^* = 0,195$, $D_R = 4000$, $t_{0,0} = -20$,

$$t_{z,0} = -15^\circ T \quad \rho_{2,0} = C_w = 1,26, \quad r_{z,\tau=0} = 90, \quad r_{0,0} = 0,895.$$

Здесь уравнение (7а) дает $\varphi_2 > 0$, а уравнение (8а) $\varphi_2 < 0$. Сначала, благодаря быстрому распространению охлаждения, относительная влажность быстро возрастает, достигая величин больших 100%, а затем постепенно опускается, асимптотически стремясь к 100%.

Результаты вычислений по формуле (2) приведены в табл. 5.

Таблица 5

Ход температуры влажности при чистой диффузии пара и радиационной теплопередаче

τ час.	0	0,01	0,25	1	2	3	4
t° (2 м)	-15,0	-19,0	-19,8	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9
t° (15 м)	-15,0	-15,2	-18,5	-19,2	-19,4	-19,5	-19,6
$r\%$ (2 м)	90	130	138	140	139	139	138
$r\%$ (15 м)	90	92	120	131	132	135	136

τ час.	5	6	7	8	9	10
t° (2 м)	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0	-20,8
t° (15 м)	-19,6	-19,7	-19,7	-19,7	-19,7	-19,8
$r\%$ (2 м)	138	137	134	133	131	131
$r\%$ (15 м)	136	137	137	137	138	138

На высоте 15 м рост r продолжается в течение 10 час., в то время как на 2-метровой высоте уже по истечении 6 час. начинает сказываться диффузия пара и влажность падает.

3. Случай радиационной теплопередачи и слабого перемешивания.

Уже небольшое перемешивание, накладывающееся на диффузию пара и радиационную диффузию тепла, резко изменяет картину. Повышение влажности в начале должно быть более слабым и быстрее переходить в асимптотическое приближение сверху к 100%.

В работе Лоха¹ указывается, что даже при полном штиле и сильной приземной инверсии перемешивание существует. Мы приняли для коэффициента турбулентной диффузии значение $D = 10$ см/сек.², повидимому, близкое к нижнему пределу. Таким образом, исходя из условия $D_w = 10,2$ (сумма коэффициента молекулярной диффузии и коэффициента турбулентной диффузии), $D = 4010$, $r_{\tau=0} = 90\%$, $t_{0,0} = 20^\circ$, $t_{z,0} = -15^\circ$, $\rho_{0,0} = 0,695$, $\rho_{z,0} = C = 1,26$ была составлена табл. 6.

Таблица 6

Ход температуры и влажности при наличии слабого перемешивания

τ час	0	0,01	0,25	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t° (2 м)	-15,0	-19,0	-19,8	-19,8	-19,9	-19,9	-19,9	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0
t° (15 м)	-15,0	-15,2	-18,5	-19,2	-19,4	-19,6	-19,6	-19,6	-19,6	-19,7	-19,7	-19,8	-19,8
$r\%$ (2 м)	90	106	102	101	101	101	101	100	100	100	100	100	100
$r\%$ (15 м)	90	92	107	104	104	103	103	102	102	102	102	102	102

При меньшей высоте раньше наступает максимум и быстрее уменьшается влажность.

4. Случай интенсивного перемешивания.

При достаточно сильном перемешивании разница между коэффициентами диффузии тепла и пара уменьшается $D_w \rightarrow D$. Если положить $t_{0,0} = -23,0$, $t_{z,0} = -15,0$, $r = 70\%$, $\rho_{z,0} = 0,980$, $\rho_{0,0} = 0,675$, то согласно (6а) и (6б) имеем вначале

$$\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} = 2,21 > \frac{10}{C_T - T_{0,0}} - 1 = 0,25$$

и в конце

$$\frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} = 2,21 > \frac{10}{C_T - T_{0,0}} = 1,25.$$

Следовательно, в течение всего процесса наблюдается рост влажности. Приняв $D_w = D = 4000$, мы получили табл. 7.

Таблица 7

Ход температуры и влажности при $D_w = D = 4000$

τ час	0	0,01	0,25	0,6	1	2	3
t° (2 м)	-15,0	-21,3	-22,7	-22,8	-22,8	-22,9	-22,9
t° (15 м)	-15,0	-15,4	-20,4	-21,3	-21,6	-22,0	-22,2
$r\%$ (2 м)	70	94	99	98	100	100	100
$r\%$ (15 м)	70	71	89	93	94	96	97
τ час	4	5	6	7	8	9	10
t° (2 м)	-22,9	-22,9	-22,9	-22,9	-22,9	-22,9	-23,0
t° (15 м)	-22,3	-22,4	-22,5	-22,5	-22,5	-22,6	-22,6
$r\%$ (2 м)	100	100	100	100	100	100	100
$r\%$ (15 м)	97	97	98	98	98	98	98

Здесь наблюдается монотонное возрастание r в течение всего периода, причем перенасыщение отсутствует. На больших высотах скорость роста меньше, как это и следует из уравнения (7).

Если предполагать, что для возникновения изморози должны осуществляться некоторые, определенные по величине состояния перенасыщения воздуха, то в этом случае изморозь не должна возникнуть. Действительно, в аналогичном случае, наблюдавшемся 21/III 1942 г. в Бугульме, когда в 19 час. мы имели $t_{2м} = -16,1$, $t_{0м} = 23,2$, и $r = 75\%$, облачность $\%$ и наблюдатель отметил по ощущению штиль—изморозь не возникла, несмотря на благоприятные в течение всей ночи условия для радиационного выхолаживания.

¹ Ло х. Gerl. Beitr. z Geophys. B. 49, H. 4, 1937.

Влияние остальных факторов

В природных условиях рассмотренная идеальная картина искажается вследствие следующих причин:

1. Наличия конденсации или сублимации перенасыщенного пара на плавающих в воздухе ядрах.
2. Отсутствия стационарности граничных условий—постепенного изменения в течение ночи температуры почвы.
3. Наличия адвекции, приносящей воздушные массы из районов с иным радиационным балансом.
4. Изменяющегося с высотой коэффициента перемешивания. Первый фактор, с одной стороны, должен привести к уменьшению градиента плотности пара у земной поверхности, а с другой, может отражаться на тепловом балансе воздуха, как физической смеси твердых, жидких и газообразных компонентов.

При малой интенсивности сублимации или конденсации может выступать охлаждающее влияние излучения частиц, при большой—нагревание, связанное с выделением скрытой теплоты. В результате влияния первого фактора можно ожидать уменьшения интенсивности отложения, причем в большей степени на земной поверхности, чем на проводах.

Второй фактор должен приводить к повышению перенасыщения по сравнению с тем, которое получилось бы при сохранении первоначальных граничных условий, а следовательно, к повышению вероятности изморози по сравнению с предвычисленной по вечерним данным.

Третий фактор может приводить как к повышению, так и к понижению влагосодержания и потому для его учета следовало бы прибегнуть к рассмотрению синоптической ситуации.

Четвертый фактор обычно уменьшает влажность, принося более сухие (менее охлажденные) массы сверху. Очевидно оба последних момента должны сильнее сказываться при более сильном ветре, чем при слабом.

Для примера мы рассмотрели март 1942 г., когда изморозь, как правило, образуется позже 19 час.—срока основных метеорологических наблюдений. Влияние ветра здесь очевидно—изморози при ветрах выше 8 м/сек. не было. Лишь в одном случае в 19 час. был ветер в 16 м/сек., но к моменту появления отложения он стих (этот случай мы исключаем из рассмотрения). Хорошо выделяется общая закономерность убывания разности $T_2 - T_0$ с ростом скорости ветра. Отрицательных разностей $T_2 - T_0$ очень мало. Зависимость между величиной $T_2 - T_0$ и вероятностью появления изморози не выделяется.

Намечается, что чем сильнее ветер в случаях с изморозью, тем больше должна быть величина

$$\delta = \frac{\rho_{0,0}}{\rho_{\text{воз}} - \rho_{0,0}} - \frac{10}{T_{\text{воз}} - T_{0,0}}$$

При $C_w - \rho_{0,0} < 0$ неравенства (6, 7, 8) меняют знак, что легко усмотреть из (4). Тогда вместо (8) будем рассматривать

$$\delta^* = \left| \frac{\rho_{0,0}}{C_w - \rho_{0,0}} \right| - \frac{10}{C_T - T_{0,0}}$$

В этом случае при стационарных граничных условиях и отсутствии адвекции влажность должна постепенно расти, приближаясь к 100%. Считая для образования изморози необходимым осуществление перенасыщения, в рассмотренном случае ($C_w - \rho_{0,0} < 0$) образование изморози наблюдаться не должно. Действительно, даже при слабых ветрах (до 5 м/сек.) и $\delta^* > 1 > 0$ изморозь не появлялась. В то же время отмечено появление осадка при более сильных ветрах

(6 и 8 м/сек.) при $\delta^* \ll 1$ и даже при отрицательных значениях δ^* . Очевидно эти случаи обусловлены сильным влиянием перечисленных выше факторов.

При стационарном характере погоды со слабой адвекцией и вертикальным перемешиванием критерий δ , по видимому, может быть использован при прогнозах появления отложений на проводах. Однако при этом следует учитывать возможные погрешности в определении δ , связанные с неточностями в измерении температуры, а тем более влажности. В других случаях необходимо изучение синоптической ситуации.

Рассмотрим теперь распределение величины отложения по высоте. Введенная ранее функция φ , равная нулю при $z=0$ и $z=\infty$ достигает максимума по модулю на некоторой высоте над землей. Отсюда вытекает, что при $D_w \ll D$ наибольшее перенасыщение должно достигаться не у самой земной поверхности, а на некоторой высоте z_k .

После резкого возрастания с высотой скорости изменения влажности, с дальнейшим поднятием вверх следует постепенное ее убывание. Перенасыщение, связанное с выхолаживанием, ослабляется диффузией пара к земной поверхности. Первое время, когда действие выхолаживания преобладает над потерей пара, в нижних слоях интенсивность процесса отложения больше, чем на высоте. Позже, прилежащие к земле слои воздуха, обедняются водяным паром и на высоте перенасыщение оказывается большим.

В случае радиационной теплопередачи и чистой диффузии пара большая интенсивность отложения на высоте 2 м сравнительно с 15 м сохраняется примерно в течение первых 5 час. Уже при слабом перемешивании это время сокращается до сотых долей часа. Таким образом, если учитывать только радиационную теплопередачу и слабое перемешивание, независимое от высоты, то следует ожидать большей массы отложений на более высоко подвешенных проводах (мы говорим об интервалах высот нормальной подвески проводов и о промежутках времени, соизмеримых с длиной зимней ночи средних широт). Увеличение коэффициента перемешивания с высотой может понизить высоту, на которой количество отложений за данный отрезок времени достигает максимума.

Возрастающее с высотой количество изморози также будет отлагаться на проводах или при достаточном перенасыщении водяным паром атмосферного воздуха, или при наличии капельно-жидкого переохлажденного тумана. Разность между температурами провода и воздуха здесь должна играть второстепенную роль, по сравнению с влиянием ветра. Чем больше скорость ветра, тем медленнее будет убывать влажность в струе воздуха, соприкасающейся с проводом (при движении ее от точки встречи вдоль его поверхности). Если на поверхности провода максимальная возможная влажность меньше имеющейся в атмосфере, то при больших скоростях ветра будет больше средний пограничный градиент влажности, а следовательно, более интенсивная сублимация.

В случаях бурного процесса сублимации, когда выделяется много скрытой теплоты, движение воздуха будет способствовать быстрейшему отводу тепла.

Так как скорость ветра в приземном слое воздуха с высотой возрастает, то при перенасыщенном состоянии атмосферы движение воздуха должно способствовать увеличению количества осадка с высотой. То же увеличение скорости ветра с высотой является основной причиной отложения больших масс пушистой изморози на высоко подвешенных проводах при капельно-жидких переохлажденных туманах.

Когда достаточно толстый слой воздуха близок к состоянию насыщения и при соприкосновении с охлаждающимися излучением проводами может возникнуть сублимация пара на твердой холодной поверхности, тогда большее количество осадка выделится на низко подвешенных проводах. Более высоко расположенные провода в силу большей конвективной теплопередачи от воздуха должны

обладать температурой, меньше отличающейся от температуры окружающей среды, а следовательно и осадок на них будет меньше. Грубо качественно покажем это для начальных условий, когда можно положить, что эффективное излучение провода $q_3 = f_1(t_B) \cdot f_2(p_w)$ компенсируется конвективной теплопередачей от воздуха

$$q_k = f_3(v) \cdot (t_B - t_n),$$

где $f_i = 1, 2, 3$, некоторые известные, монотонно изменяющиеся функции соответственно от t_B — температуры воздуха, p_w — давления водяного пара, v — скорости ветра у провода, t_n — температуры провода. Полагая $q_k = q_3$, имеем

$$t_n = t_B - \frac{f_1(t_B) f_2 \cdot (p_w)}{f_3(v)}. \quad (10)$$

Быстрое увеличение v и, следовательно, $f_3(v)$ с высотой при более медленном убывании числителя должно приводить к уменьшению разницы между температурами воздуха и провода, а следовательно, к менее благоприятным для начала сублимации условиям.

Если, например, температура воздуха $t_B = -15^\circ$, $q_3 = 0,1 \frac{\text{кал.}}{\text{см}^2/\text{мин.}}$, коэффициент теплопередачи $f_3(v)$ положим равным по Олаф де-Вик

$$A_2 = f_3(v) = 0,0233 \sqrt{v + 0,3} \frac{\text{кал.}}{\text{см}^2 \text{ мин. град.}}$$

(коэффициент теплопередачи снега в воздух), тогда на меньшей высоте, где $v = 1$ м/сек., имеем $t_n = -17,6$, на большой высоте, где $v = 2$ м/сек., получаем $t_n = -17,0$. Отсюда следует, что при данных условиях, внизу на поверхности провода насыщение достигается примерно при 78% влажности, в то время как на большей высоте, где $v = 2$ м/сек. — при 83%.

Если же относительную влажность находить, пользуясь таблицами максимальной упругости пара, вычисленными для поверхности воды, а не льда, как это имело место ранее, то мы получим соответственно

$$r_B(v = 1 \text{ м/сек.}) = 68\%, \quad r_B(v = 2 \text{ м/сек.}) = 73\%.$$

Относительные влажности такого порядка величины нередко встречаются при процессах сублимации отложений на проводах, подтверждая инеобразный характер осадка. Интересно отметить, что в течение осенне-зимнего сезона 1941—1942 г. в 23% от всех случаев отложений на проводах относительная влажность была ниже 100% даже по отношению ко льду, в 6% случаев она соответствовала насыщенному по отношению ко льду состоянию и в 71% — наблюдалось перенасыщение по отношению ко льду (из них меньше 4% случаев приходится на насыщенное по отношению к воде состояние). Возможно, что имело место и перенасыщение по отношению к водной поверхности, но в результате обработки записей волосного гигрографа этого установить не удалось.

В дни с вечерним появлением изморози отсутствие перенасыщения по отношению ко льду наблюдалось примерно в 50% от числа случаев.

Учитывая, вообще говоря, малую точность показаний приборов, основанных на гигроскопических свойствах волоса, мы сопоставили случаи недонасыщения, полученные по гигрографу, установленному на 2-метровой высоте, с записями гигрографа на высоте 15 м. Полученное преобладающее совпадение разностей

$$r = \frac{E_{\text{max}} \cdot \text{льда}}{E_{\text{max}} \cdot \text{воды}} 100$$

по знаку (где r — относительная влажность воздуха, $E_{\text{тах}}$ льда — максимальная возможная при данной температуре упругость пара над поверхностью льда, $E_{\text{тах}}$ воды — тоже для воды, говорит в пользу реальности найденных малых влажностей при наличии отложений на проводах.

Воздух, охлажденный соприкосновением с подстилающей поверхностью и благодаря этому имеющий большую плотность и относительную влажность, стремится заполнить углубления в рельефе местности (котлованы, лобные просеки, поляны и проч.). Нередко струи стекающего холодного воздуха легко проследить благодаря появлению внутри них тумана. Заполнение выемок близкими к состоянию насыщения (а тем более уже с туманом) массами воздуха должно приводить к большей вероятности появления и большим количествам там отложений на проводах. Это хорошо согласуется с известным явлением, большей повреждаемостью, изморозью линий связи в лесных просеках, на небольших полянах и т. п.

Если на фоне перенасыщения атмосферы заметно выступает влияние эффективного излучения проводов, тогда после некоторого убывания с высотой количества отложений намечается дальнейшее увеличение массы осадка.

Некоторые выводы

Касаясь возможных пассивных способов предохранения линий электропередач от чрезмерно больших изморозевых нагрузок, обратим внимание на необходимость учитывать происхождение осадка. Если в районах с большой повторяемостью адвективной (макросиноптического происхождения) изморози и гололедов целесообразно устраивать ветрозащитные полосы, то для защиты от местной радиационной „изморози“ кажется рациональным поднимать выше провода. Последнее полезно иметь в виду при прокладывании линий связи в просеках через лесные массивы.

В высоком строевом лесу с густыми кронами может оказаться более целесообразным не прорубать широких просек, а вести линию, как в крытом коридоре, внутри лесного массива под защитой крон.

В больших глубоких котловинах, характеризующихся частыми зимою туманами, простирающимися на достаточную высоту, некоторого уменьшения массы отложений на проводах возможно удастся достигнуть ветрозащитными полосами.

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ТУМАНА НА ОБЛЕДЕНЕНИЕ ПРОВОДОВ

Обледенение наземных предметов представляет собою образование на их поверхностях твердой фазы воды из атмосферы. Физико-метеорологические условия, при которых возможно появление подобных отложений, могут быть весьма разнообразны, отчего само явление приобретает весьма сложный характер. Как известно, физика этих явлений позволяет ожидать появления на поверхности предметов ледяных отложений вследствие различных причин: 1) путем отложения твердой фазы воды непосредственно из газообразной, т. е. вследствие процесса сублимации водяного пара на поверхности предметов, 2) путем перехода в твердое состояние осевшей на предметах жидкой фазы воды (непереохлажденной или переохлажденной), т. е. вследствие замерзания последней, 3) путем непосредственного отложения на поверхности предметов твердой фазы воды из атмосферы, т. е. вследствие явления примерзания и 4) смешанным образом.

Тот или иной физический процесс определяется метеорологическим состоянием атмосферы и, в свою очередь, зависит от свойств самих предметов и от их аэродинамики.

Влияние перечисленных факторов приводит к тому, что не представляется возможным на основании сравнительно небольшого числа измеряемых величин, установить однозначную связь между метеорологическим состоянием атмосферы и формой, и микроструктурой ледяных отложений на предметах. Поэтому и существующая классификация ледяных отложений с разделением ее на основные виды — иней, изморозь, гололед, смеси — не отражает всех особенностей процесса. В частности нет даже твердо установившихся взглядов на явление образования изморози, а описания этого явления у различных авторов противоречат друг другу.

Наиболее отличны по своему характеру и по своим последствиям ледяные отложения, образующиеся на предметах вне туманной зоны и в тумане, в особенности, когда туман состоит из крупных переохлажденных капель. В первом случае интенсивность сублимационного процесса невелика и обычно не вызывает опасений по своим последствиям. Отложения образуются небольшой плотности, снеговидного характера и имеют мелкокристаллическую структуру. Наоборот, во втором случае, интенсивность процесса, носящего название гололеда, может быть очень велика, толщина образующейся плотной ледяной корки значительна и последствия огромны. Кроме того, само явление „гололеда“ имеет всегда сложный характер, так как замерзание на предметах оседающих капель сопровождается часто еще сублимационным процессом. Механизм образования гололеда можно себе представить протекающим следующим образом:

1. В первой стадии на поверхности предметов образуются первичные зачатки льдобразований в виде замерзшей водяной пленки или кристаллических отложений. В этой стадии процесса существенное значение имеют состояние поверхности предметов и физические свойства последних.

2. Появление таких первичных отложений облегчает дальнейшее нарастание твердого осадка и в то же самое время изолирует его от предмета. Так как лед

обладает сравнительно небольшой теплопроводностью, то таким образом постепенно теряют свое значение индивидуальные качества предметов.

3. В дальнейшем процесс обледенения предметов определяется только количеством капель тумана, оседающих на предметах и процессом их замерзания. Что касается последнего, то он зависит как от скорости, растекания капель по поверхности предмета, так и от скорости кристаллизации капель и условий теплообмена образующихся ледяных отложений с окружающим воздухом. Размер капель, химический состав воды, а возможно даже электрические заряды капель, предопределяют в этом случае структуру образующегося осадка.

Однако решающим фактором, от которого зависит прежде всего интенсивность нарастания гололеда, является количество воды, которое оседает на предметах в виде капель тумана. Это количество воды, кроме зависимости от влажности тумана и скорости ветра, тесно связано также с микроструктурой тумана и с аэродинамическими свойствами предметов. К сожалению, до сих пор не существует ни общих методов расчета, ни удовлетворительных формул по этому вопросу. Известная формула Нотта выражает до некоторой степени только самоочевидное предположение и для количественных расчетов не применима. Согласно формуле Нотта вес ледяной корки M , образующейся на единице поверхности предмета в тумане, равен

$$M = C w u_0 \sin \beta \cdot t,$$

где w — содержание воды в воздухе, u_0 — скорость невозмущенного потока, β — угол встречи капель с поверхностью тела, t — время.

Коэффициент C — скрывает в себе зависимость количества оседающей воды от аэродинамических свойств предметов, состояния их поверхности, размеров капель тумана, влажности, температуры, давления воздуха. Ни теоретических расчетов, ни экспериментально найденной величины для этого коэффициента не имеется.

Таким образом, по существу, этот коэффициент скрывает в себе все особенности протекания процесса нарастания льдообразований в различных туманах и на предметах различных форм. Произвольным остается также предположение о значении угла β . Вне зависимости, однако, от решения этого вопроса во всем его объеме, на практике представляет большой интерес найти удовлетворительный метод для сравнительного определения интенсивности нарастания гололеда (в одинаковых условиях) на предметах различной величины. Для предметов одинаковой формы это дало бы возможность судить об ожидаемой интенсивности обледенения на различных по величине предметах по наблюдению над обледенением одного из них.

Подобный случай может представиться при зондировании атмосферы и наблюдении обледенения в облаках на каком-либо специально контролируемом предмете; равным образом это позволило бы использовать имеющийся статистический материал по наблюдению над обледенением предметов, при проектировании новых установок, предполагаемых для размещения в том же районе, как например, при устройстве и проектировании воздушных линий связи и электропередач.

За последнее время этому вопросу в литературе начинают уделять достаточное внимание, что свидетельствует о возросшем интересе к этим явлениям. Несомненно наиболее заинтересованной страной в этом отношении является СССР, в котором отдельные районы из года в год поражаются гололедом. В применении к обледенению проводов подобная задача может быть решена, в настоящее время, с достаточным приближением и поэтому представляет не только теоретический, но и практический интерес. Основной проблемой в этом вопросе является изучение движения капли около провода и нахождения того „опасного пучка траектории капель“, который весь перехватывается проводом.

Для этой цели рассмотрим траекторию капли около тела цилиндрической формы при следующем предположении: 1) допустим, что вокруг провода, существует ламинарное, безвихревое движение потока воздуха; 2) пренебрежем сжатием

воздуха внутри потока и 3) рассмотрим случай, когда направление потока перпендикулярно оси провода (рис. 1). В этих предположениях течение воздуха вокруг тела цилиндрической формы описывается помощью комплексной функции $\omega = \varphi + i\psi$, для которой потенциал скорости φ и функция потока ψ , в полярных координатах, при направлении потока вдоль оси x -ов имеют выражение:

$$\varphi = u_0 \left(r + \frac{R^2}{r} \right) \cos \Theta = u_0 x \left(1 + \frac{R^2}{x^2 + y^2} \right) \quad (1)$$

$$\psi = u_0 \left(r - \frac{R^2}{r} \right) \sin \Theta = u_0 y \left(1 - \frac{R^2}{x^2 + y^2} \right), \quad (2)$$

где u_0 — есть скорость невозмущенного потока.

Уравнение линий тока определяется выражением:

$$y \left(1 - \frac{R^2}{x^2 + y^2} \right) = \lambda, \quad (3)$$

причем граничной линией тока является окружность провода, для которой при $r = R$, $\psi = 0$.

Последнее выражение позволяет вычислить линии тока для различных параметров и определить радиусы кривизны ρ этих кривых в любой точке. Чтобы решить поставленную задачу, необходимо было бы рассмотреть действительное движение

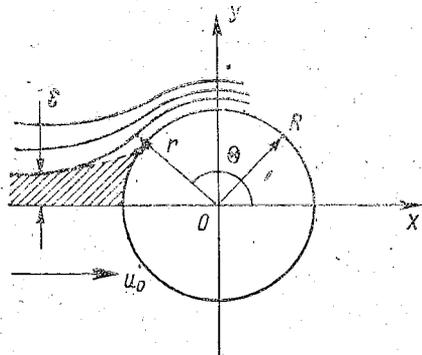


Рис. 1. Линии тока.

капли в потоке воздуха, в предположении, что капля, при движении ее по линии тока, находится под действием отклоняющей центробежной силы $\frac{m v^2}{\rho}$ (влиянием силы тяжести

пренебрегаем). Тогда величина отклонения капли от линии тока может быть найдена по скорости движения ее в направлении, перпендикулярном к линии тока, для чего следует приравнять величину отклоняющей силы, стоковой силе сопротивления движения капли в потоке воздуха. Очевидно, что подобные вычисления для одной и той же капли определенного

размера следует проделать, переходя с одной линии тока на другую. Таким последовательным вычислением можно определить положение той, наиболее удаленной от оси линии тока, которая является крайней в „опасном пучке траекторий“ и таким образом найти ширину полосы 2δ , находясь в пределах которой, рассматриваемые капли все осядут на проводе. Само собой разумеется, что этот путь решения задачи требует весьма длительных вычислений и при делаемых упрощающих предположениях не оправдывает себя. Подобным образом В. Блеккер [1] в 1932 г. пытался оценить количество капель, которое попадает на тело цилиндрической формы при заданных условиях. В своих вычислениях он принимал касательную скорость капли v равной скорости u движения частиц воздуха, и, кроме того, в свои расчеты вводил только наибольший радиус кривизны той линии тока, на которой первоначально находилась капля. При таком грубом подсчете, для случая цилиндра с $R = 25$ см и скорости потока воздуха $u_0 = 50$ м/сек. (размер капель не указан) Блеккер нашел, что на цилиндре должно осесть во всяком случае более десятой части возможного предельного числа капель. Другой путь решения этой задачи был использован И. Лесей [8] в его статье об изучении метеорологических и физических факторов, влияющих на образование льда на самолетах.

Этот путь решения заключается в следующем. Рассматривая движение капли в потоке воздуха около тела цилиндрической формы (рис. 1), мы можем напи-

сать следующие уравнения для движения капли при малом числе Рейнольдса (действием силы тяжести пренебрегаем):

$$m \frac{dv_x}{dt} = -k \Delta v_x; \quad (4)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -k \Delta v_y, \quad (5)$$

где v (v_x, v_y) — скорость капли относительно неподвижных координатных осей (абсолютная скорость капли), Δv ($\Delta v_x, \Delta v_y$) — относительная скорость капли (по отношению к частицам воздуха) $k = 6 \pi \mu a$ — коэффициент в формуле Стокса. Так как относительная скорость капли мала по сравнению с ее абсолютной скоростью, а также по сравнению со скоростью движения частиц воздуха, т. е., если положить $\Delta v < v$ и $\Delta v < u$, то можно переписать (5) следующим образом:

$$m \frac{du_y}{dt} = -k \frac{dy_k}{dt}, \quad (6)$$

где y_k — есть уже абсолютное смещение капли в направлении оси \bar{Y} . Последнее остается справедливым при условии, что отклонение капли от линии тока незначительное.

Из (6) получим

$$y_k = - \left(\frac{m}{k} \right) u_y. \quad (7)$$

Так как из (1)

$$u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = - \frac{2 u_0 R^2 xy}{r^4},$$

то

$$y_k = \frac{m}{k} \cdot \frac{2 u_0 R^2 xy}{r^4}. \quad (8)$$

Равным образом найдем, что

$$x_k = \frac{m}{k} \cdot \frac{u_0 R^2 (x^2 - y^2)}{r^4}. \quad (9)$$

Последнее выражение показывает, что для $x = \pm y$, $x_k = 0$, т. е. смещение капли в направлении оси x -ов прекращается для всех капель, расположенных на диагонали $x = \pm y$. На этой линии в рассматриваемом на чертеже квадрате $xy = x^2 = -\frac{r^2}{2}$ и, таким образом,

$$y_k = - \frac{m}{k} \cdot \frac{u_0 R^2}{r^2}. \quad (10)$$

Поэтому смещение капли, расположенной на этой линии по направлению радиуса к центру будет

$$r_k = \frac{y_k}{\sqrt{2}} = - \frac{m}{k \sqrt{2}} \cdot \frac{u_0 R^2}{r^2}. \quad (11)$$

Следовательно, только те капли могут коснуться поверхности цилиндра, для которых выполняется условие

$$r_k = r - R = \frac{m}{k \sqrt{2}} \cdot \frac{u^2 R^2}{r^2}. \quad (12)$$

Это условие можно переписать еще следующим образом:

$$\frac{m}{k\sqrt{2}} \cdot \frac{u_0}{R} = \frac{r^2}{R^2} \left(\frac{r}{R} - 1 \right) = A. \quad (13)$$

Далее из (2), видно, что так как в удалении, в невозмущенном потоке $\psi = u_0 y = u_0 \delta$, то можно считать справедливым соотношение

$$\delta = y \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right).$$

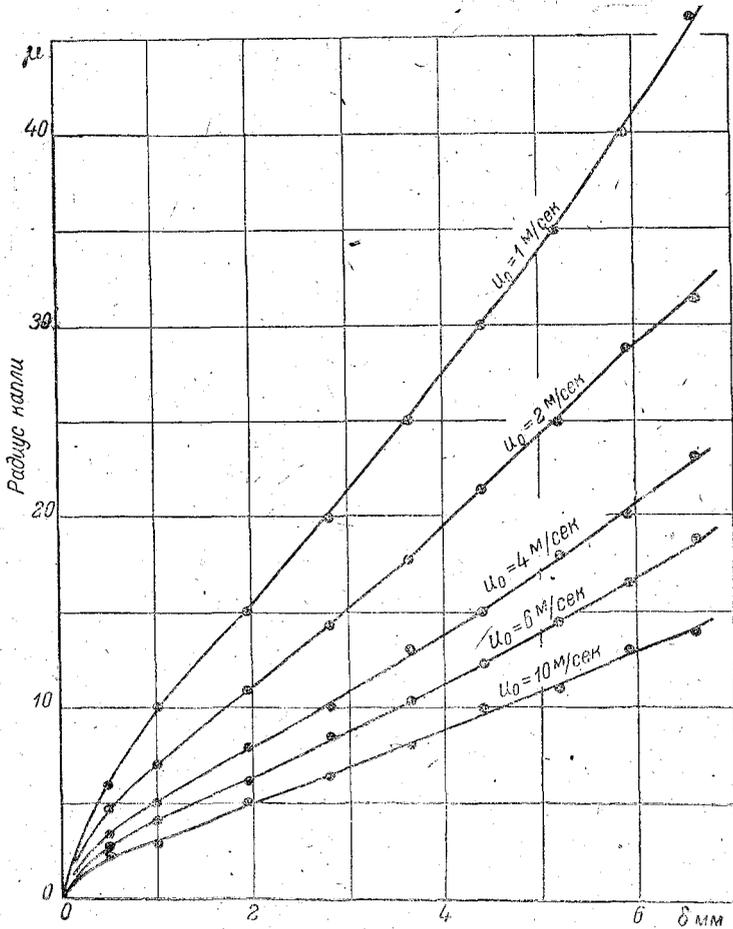


Рис. 2. Диаметр провода. $D = 5$ мм.

Для капель, расположенных на диагонали $x = -y$, $y = \frac{r}{\sqrt{2}}$, поэтому

$$\frac{\delta}{R} = \frac{r}{R\sqrt{2}} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) = B. \quad (14)$$

Наконец из (13) находим величину соответствующей капли

$$a = \sqrt{\frac{9AR}{V \cdot 2u_0}} = 3,3 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{AR}{u_0}}. \quad (15)$$

Уравнения (13), (14) и (15) позволяют определить интересующие нас величины a и δ , т. е. найти ширину той наибольшей полосы потока воздуха, из ко-

торой осядут на поверхности цилиндра все капли данного размера при заданной скорости невозмущенного потока u_0 и радиуса цилиндра R .

Для этой цели следует, задаваясь различными отношениями $\frac{r}{R}$, вычислить из (13) и (14) соответствующие значения для A и B . После чего из (14) найдем

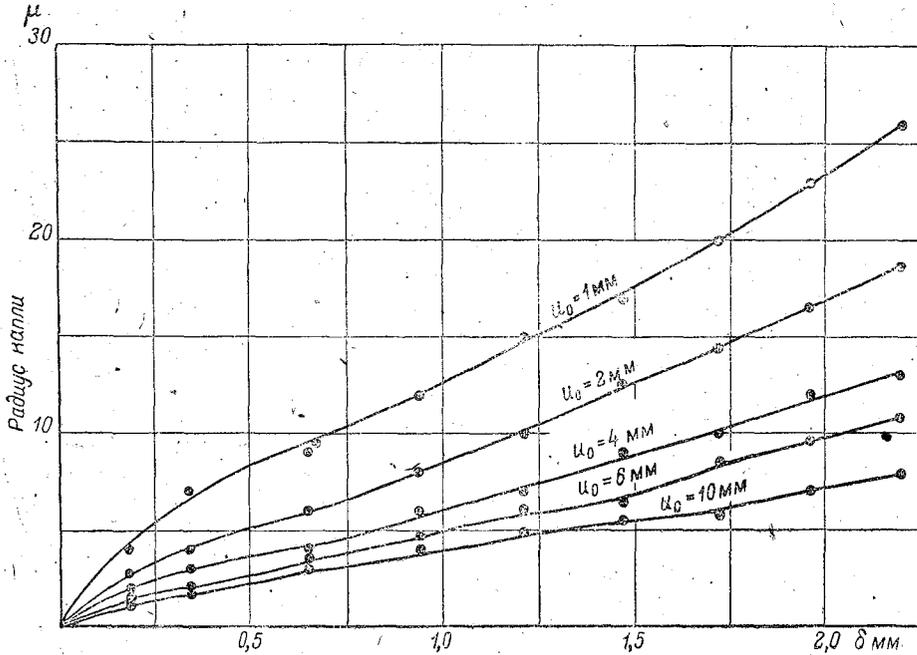


Рис. 3. Диаметр провода. $D = 15$ мм.

$\delta = BR$ и из (15) соответствующее значение для a . Если известно при этом число капель в единице объема, или водность тумана, то можно будет определить и общее количество воды, осаждающееся на поверхности цилиндра за какой-либо промежуток времени.

Подобные расчеты были нами проделаны для двух проводов — $d_1 = 5$ мм и $d_2 = 15$ мм, как представляющие наибольший практический интерес. На рис. 2 приведены кривые для 5 мм провода, которые дают зависимость между шириной полосы δ , из которой осаждаются капли на поверхности провода, и размерами самих капель a , для различных скоростей ветра. На рис. 3 те же кривые построены для 15 мм провода. Как видно из этих графиков, в основном, существует линейная зависимость между a и δ для всех приведенных скоростей ветра.

Сравнение между собою интенсивностей обледенения этих проводов в туманах с одинаковыми характеристиками можно провести по толщине корки ледяных отложений, образующихся на переднем крае проводов. Профиль этих отложений при гололеде, как показывают наблюдения, часто имеют очертание по эллипсу.

При этом условии общая величина ледяных отложений на единицу длины провода будет измеряться половиной разностью между площадью эллипса, имеющего оси R и $R + h$ и площадью круга радиуса R (рис. 4). Таким образом можно написать, что

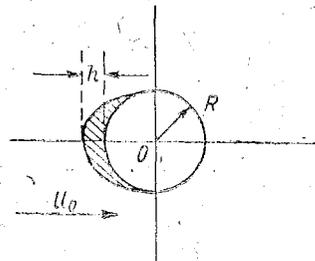


Рис. 4. Профиль гололедного отложения.

$$\delta_1 u_0 w = \frac{\pi R_1 h_1}{4} \Delta;$$

$$\delta_2 u_0 w = \frac{\pi R_2 h_2}{4} \Delta,$$

где w — водность тумана, Δ — плотность ледяного отложения.

Отсюда сравнительная интенсивность обледенения этих проводов может быть выражена отношением

$$k = \frac{h_1}{h_2} = \frac{\delta_1}{\delta_2} \cdot \frac{R_2}{R_1}.$$

На (рис. 5) приведены значения коэффициента k , показывающего отношение интенсивности обледенения 5-миллиметрового провода к 15-миллиметровому, при

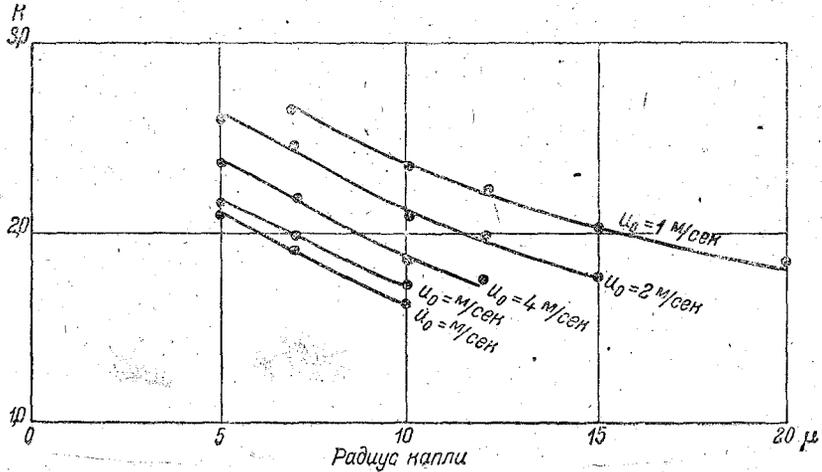


Рис. 5. Радиус капли в м.

различных скоростях ветра и для различных размеров капель. Как видно из рис. 5, при небольших скоростях ветра это отношение может быть значительным. Подобные кривые могут быть построены для проводов любых других диаметров, а также для тел цилиндрической формы и, таким образом, позволяют получить данные для суждения о сравнительной скорости обледенения проводов в одинаковых условиях.

Из литературных данных известны опыты Ритца в аэродинамической трубе с двумя цилиндрами диаметром 50 и 100 см. В этих опытах при различных скоростях потока воздуха, в который вводились водяные капли 3 размеров — 10, 50 и 100 м, измерялось относительное количество капель, осаждающихся на поверхностях цилиндров. Применяемые Ритцем скорости потока воздуха были велики и доходили до 200 м/сек. Из приводимого им графика можно также вычислить значение коэффициента k , введенного нами выше.

Для капель размерами 10, 50 и 100 м, при скорости потока $u_0 = 200$ м/сек., значение коэффициента k соответственно оказалось равным 1,4, 1,13 и 1,05. Если этот коэффициент вычислить на основании изложенных выше теоретических соображений, то при той же скорости потока для капель размерами 10 м значение этого коэффициента будет равно также 1,4. Что же касается капель размерами в 50 и 100 м, то вычисленное значение этого коэффициента становится уже равным единице. Следует предположить, что имеющееся здесь расхождение объясняется не только теми допущениями, которые сделаны в изложенной теории, но также и тем обстоятельством, что при таких больших скоростях потока, которые

применялись Ритцем, часть капель должна была слудаться с поверхности цилиндров.

Н. С. Муретов [11], в своей брошюре „Гололедные образования на воздушных линиях связи и электропередачи“ приводит обработанные результаты наблюдений Ново-Пятигорской опытно-исследовательской гололедной станции за три года по изучению гололедных образований на проводах различных диаметров. Из приведенных им графиков и таблиц (стр. 62—67) видно, что по мере увеличения диаметра провода уменьшается вес и толщина корки гололедообразования. Для проводов диаметром 5 и 15 мм это отношение равно 2,3, что соответствует нашим расчетам (рис. 5). К сожалению данных о скорости ветра и размерах капель в этой брошюре не имеется.

Изложенные выше теоретические соображения позволяют обратить задачу исследования и на основании измерения толщины корки льда, отложенной на проводах различных сечений, выяснить основные микрохарактеристики тумана. Для этой цели, пользуясь произведенными обмерами отложений на проводах, следует определить величину коэффициента k и, зная среднюю скорость потока по графику рис. 5, найти средний размер капель тумана. Далее из графика (рис. 2 или рис. 3) можно найти величину 2δ , отвечающую данной скорости потока, и, зная прирост гололеда на проводе за единицу времени, определить водность тумана и число капель в единице объема. Само собой разумеется, что эти определения большой точности иметь не могут.

В заключение следует заметить, что в то время, как выпадающие твердые осадки изучены сравнительно хорошо, ледяные отложения на предметах, к сожалению, изучены очень мало как по форме, так и по микроструктуре.

Для первых мы имеем и установившуюся классификацию и прекрасные микрофотографии, в то же время, как во втором случае до сих пор нет, например, ясной и подробной классификации различных изморозей, и их микроструктура изучена совсем недостаточно. Между тем, работа в этом направлении чрезвычайно помогла бы вскрыть кинетику всего сложного процесса обледенения предметов в наземных туманах.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Влескер. Met. zeit. N. 9, 349, 1932.
2. Гапонов Б. С. Температурные границы оседания гололеда и изморози из переохлажденных капель тумана. Изв. АН, сер. геогр. и геоф., № 2, 1939.
3. Альтберг В. Я. О центрах или ядрах кристаллизации воды. Met. и гидр., № 3, 1938.
4. То же, № 3, 1939.
5. Арнольд-Алябьев В. И. Об исследовании физических свойств твердых гидрометеоров. Met. и гидр., № 3, 1939.
6. Головков М. П. О некоторых свойствах льда, образующегося при обледенении самолетов. Изв. АН, сер. геогр. и геоф., № 1, 1940.
7. Вейнберг Б. П. Лед. Гостехиздат, 1940.
8. Lacey L. K. Bul. Amer. Met. Soc. v. 21, № 9, 1940.
9. Arenberg D. L., Harney P. I. Bul. Amer. Met. Soc. v. 22, № 2, 1941.
10. Arenberg D. L. Bul. Amer. Met. Soc. v. 23, № 6, 1942.
11. Муретов Н. С. Гололедные образования на воздушных линиях связи и электропередачи. Гидрометеозиздат, 1945.

ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЗАКАВКАЗЬЕ

Как известно, толчком для начала исследований особенностей гололедных явлений в горных условиях явилось расхождение между величинами гололедных образований, принятыми в качестве норм для проектирований линий передач и теми, которые наблюдались в действительности в горных участках функционирующих энергосетей в различных странах.

Тяжелые случаи явлений обледенения высоковольтных сетей на горных участках в Испании (Сеговия), Германии (Тюрингенский горный район), Франции (Овернь), Австрии (линия Неваг), Италии (горные участки по Аппенинскому хребту), Японии и др. освещены в иностранной литературе.

Наблюдавшиеся здесь нагрузки превысили расчетные нормы в 2—3 раза (Тюрингенский район), в отдельных случаях в 7—8 раз (Сеговия).

Такого же рода явления наблюдались и после введения в эксплуатацию линий передач в Закавказье или на Северном Кавказе. Так, на линии электропередач Кировакан Дзорагэс в 1935—1937 гг. имели место обледенения с диаметром до 20 см, сопровождавшиеся обрывами проводов. На линиях Баксанстроя в 1937 г. имели место аварии при нагрузках до 3 и более килограмм на погонный метр.

Причиной указанного расхождения расчетных и действительных нагрузок является различие в характере возникновения и роста образований в равнинных условиях, по данным которых строились нормы, и в условиях горного рельефа. Отсюда возникла неотложная необходимость в изучении явлений в этих последних условиях.

Начало изучения явлений обледенений в горных условиях Закавказья было положено в 1933 г. в связи с проектированием линии электропередач Храмгэс (Храмская государственная электростанция в Грузии); под руководством автора эта работа проводилась в Тбилисском научно-исследовательском гидро-энергетическом институте (ТбилисНИГЭИ) с 1933 по 1937 г. методом специальных гололедных установок по трассе линии передач на высотных отметках 1000—1700 м; в том же Институте в период 1935—1936 гг. было произведено изучение гололедных явлений на функционирующей линии передач Дзорагэс (Армения) на высотах 1800—2000 м над уровнем моря. В те же годы под руководством автора в ТбилисНИГЭИ были поставлены лабораторные исследования в камерах холодильника по изучению механизма образования обледенений в искусственных условиях. В 1936—1938 гг. автор провел анализ вероятных гололедных условий для строящихся линий передач Сухумгэса (Абхазия) и линий Цхакая-Поти-Махарадзе и Зестафони-Чиатура (Западная Грузия).

В 1940—1942 гг. им же, совместно с инж. С. И. Шабуровым, в Энергетическом секторе Академии Наук Грузинской ССР был сделан опыт районирования Грузинской республики по метеорологическим условиям для целей строительства высоковольтных линий передач, и построена карта гололедно-изморозевых районов Грузии. В 1943 г. автор произвел анализ условия гололедообразования на трассе линии передачи Дзорагэс по материалам 10-летних наблюдений (1933—1943 гг.) и на его основе рассмотрел вопрос о прогнозе гололедных явлений для Закавказья.

Наконец, в зиму 1944/45 гг. синоптиком Управления гидрометслужбы Закавказского фронта инженер-капитаном К. И. Папинашвили при участии автора через Институт сооружений передавались систематические сведения о долгосрочных прогнозах для энергосистем Северного Кавказа.

Более чем десятилетний опыт работы автора в этой области позволил получить для ряда вопросов достаточно надежные выводы, а для других наметить предварительные соображения, как в отношении генезиса самого явления в горных условиях, его особенностей в отношении структуры, формы и сопровождающих метеорологических явлений, так и в отношении прогнозов явления и, наконец, в отношении дальнейших мероприятий по исследованию явления.

Большая часть выводов и соображений изложена автором в записках, очерках и отчетах, находящихся в соответствующих учреждениях (Грузэнерго, Энергетический сектор Академии Наук Грузинской ССР, Институт сооружений и др.), часть из них приведена в указанной выше опубликованной работе по районированию Грузии¹.

Содержание настоящей статьи представляет сводку в самом сжатом виде наиболее важных выводов и соображений.

Характер и особенности явлений обледенения в горных районах Закавказья и физико-метеорологические условия их генезиса и развития

1. Важнейшей особенностью явлений обледенения в Закавказье является их тесная связь с облачными образованиями: во всех случаях более или менее интенсивного осаднения ледовых элементов на деревьях, проводах и других предметах, место осаднения находится в облачном слое, который наблюдателями отмечается, как более или менее густой туман. Как правило туман этот состоит из капелек при температурах ниже 0°. Явления обледенений вне облачного слоя (выше или ниже его) наблюдаются редко, нехарактерны и дают совершенно незначительные слои льда, не имеющие практического значения.

Таким образом наибольшую повторяемость и интенсивность, а следовательно, и практическое значение в условиях Закавказья имеют отложения, осаждающиеся из переохлажденных капель, внутри облачного слоя, отмечаемого на месте наблюдения как туман.

Необходимо отметить, что эта особенность сближает условия обледенения в горных районах с условиями обледенения летательных аппаратов. Подобное обстоятельство делает изучение явлений горных гололедов интересным и для авиации.

2. Следствием рассмотренного обстоятельства является то положение, что основной формой отложений атмосферного льда в горных условиях является не гололед, но изморозь в различных стадиях своего развития (см. ниже)—от мелких скелетных форм с удельным весом² порядка 0,1 до форм уплотненных, но с явной кристаллической структурой, с удельным весом от 0,3 до 0,7, т. е. форм, носящих в литературе название „смеси“. Формы чистого гололеда или отсутствуют вовсе или имеют незначительную толщину порядка нескольких миллиметров и наблюдаются в указанных выше зонах незначительного обледенения (выше или ниже зоны интенсивного обледенения). Иногда отмечается наличие тонкого ледяного слоя (очевидно в результате начальной стадии процесса), на котором развивается интенсивный слой изморозевого характера.

¹ Балабуев А. Г. и Шабуров С. И. Опыт районирования Грузии по метусловиям целей строительства линии электропередачи. Сект. Энерг. АН Груз. ССР, № 1, 1941.

² Здесь и везде ниже удельный вес понимается, как условно-относящийся ко всему объему, контуры которого очерчиваются крайними точками отложения.

Отмеченные элементы (прослойки) цельного льда в „смеси“, как правило, являются результатом вторичных процессов (оттаивания и последующего замерзания).

Таким образом вторым отличием горных обледенений от наблюдаемых в равнинных условиях является первенствующая роль изморози.

3. Основными факторами, определяющими форму и интенсивность отложений, являются: степень содержания в воздухе элементов осаждения (т. е. переохлажденных капель), влажность воздуха, скорость и направление ветра, продолжительность осаждения (т. е. нахождения в облачном слое), физические свойства поверхности, теплопроводность и масса тела, на котором идет осаждение ледяных элементов.

Сочетание указанных факторов определяет разнообразие в формах и характере отложений.

Повидимому, в наиболее типичном виде процесс обледенения протекает в форме следующих стадий:

1-ая стадия, которую можно назвать стадией зарождения, заключается в осаждении первичных (зародышевых) элементов на поверхности тела. Во внешней форме эта стадия вовсе или почти не замечается вследствие ничтожной величины первичных элементов. Но роль этой стадии исключительно велика, так как она определяет дальнейшее разветвление процесса.

Основную роль в этой стадии, при прочих равных условиях, играют физические свойства тела, на котором происходит осаждение, как внутренние (главным образом теплоемкость и теплопроводность), так и поверхностные—гидрофильность и гидрофобность, т. е. отношение к воде—прилипание¹, а также внешняя форма (контуры) предмета.

2-ая стадия—стадия скелетных форм на осевших первичных элементах (возможно, что здесь принимает участие и явление сублимации). В этой стадии основная роль переходит уже к внешним факторам, хотя значение формы тела еще сохраняется. Результатом стадии этого процесса являются легкие (по условному удельному весу) образования, состоящие из игол или других отдельно расположенных кристаллов со значительными воздушными промежутками между ними.

3-ая стадия—стадия заполнения—заключается в заполнении промежутков скелетных форм и перехода их в полные формы с соответствующим увеличением удельного веса.

Структурные (т. е. кристаллические) особенности сохраняются; роль формы и физических свойств тела становится незначительной. Наибольшую роль приобретают внешние факторы и явления режеляции.

4-ая стадия, которую можно было бы назвать стадией вторичных явлений, является результатом процессов оттаивания, вторичного замерзания (иногда повторяющихся несколько раз), налипания снежных элементов, механических изменений и т. п. и дает окончательное заполнение формы и максимальное увеличение размеров и удельного веса.

Иногда описанные процессы протекают полностью, но чаще ограничиваются только первыми тремя, или первыми двумя (например, на трассе линии передачи Храгэс). Иногда, повидимому, при большой скорости разветвления процесса (значительная влажность, большое число элементов осаждения; значительный ветер) 2-ая и 3-я стадии идут вместе; это наблюдалось нередко, в частности, на линии передачи Дзоргагэс.

Конечно, намеченная выше картина разветвления процессов обледенения не может считаться достаточно полно исчерпывающей явление и требует дальнейшего наблюдения.

¹ Может быть правильнее сказать „криофильность“ и „криофобность“, но эти термины еще не приняты.

4. В результате совокупного воздействия всех факторов формы обледенений приобретают очень разнообразный характер: односторонние отложения в виде „флага“ или „бороды“ с различным наклоном ее к горизонту, формы овальные с резко эксцентричным расположением провода и формы круговые с более или менее выраженным центральным расположением провода.

Формы в виде флага или бороды обычно имеют характер, соответствующий 2-ой (в легких случаях) или 3-й стадии образования осадка (в более интенсивно выраженных случаях). Увеличение объема бороды в большинстве интенсивных случаев происходит, по видимому, вследствие скручивания провода под односторонней нагрузкой и подставления новых участков провода под удар воздушного потока, несущего переохлажденные капли¹.

Образование этих форм наблюдается при ветрах, встречающих провод под большим углом, близким к прямому.

Образование осадений изморози вокруг провода, т. е. форм, названных нами круговыми, происходит по нашему представлению и вопреки представлению некоторых авторов (Туроверов), при ветрах, дующих под острым углом к проводу. В этом случае сначала образуются (в 1-й стадии) осадения элементов в отдельных точках по всей окружности провода, на них нарастают скелетные формы (иглы), иногда в виде более или менее правильно расположенных колец.

Такая форма в прекрасно выраженном виде наблюдалась А. К. Лятковским на высокогорной метеорологической станции Алагез (рис. 1). Затем, благодаря завихрениям, происходит заполнение промежутков между кольцами и в результате возникают образования значительной мощности (3-я и 4-я стадии (рис. 2). Имеются все основания предполагать (форма и структура отложений), что наиболее тяжелые формы явлений, наблюдавшиеся на линии передачи Дзоргагес имели такое происхождение. Линия передач здесь расположена по отношению к гололедонесущему потоку под острым углом. Такая же форма осадков хорошо видна на photographиях многих случаев, имевших место на Северном Кавказе.

Как известно, круговые формы обледенений представляются наиболее устойчивыми и труднее ликвидируемые методами механического удаления или нагревом проводов.

5. Метеорологические условия, сопутствующие явлениям обледенения в горных районах Закавказья, довольно разнообразны и, в первую очередь, зависят от си-

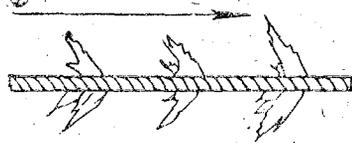


Рис. 1. Изморозевые кольца, наблюдавшиеся на г. Алагез.

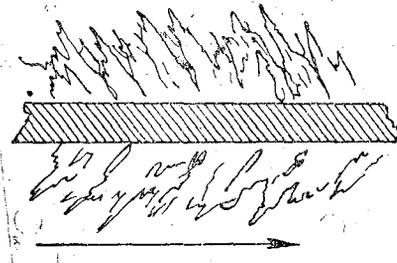
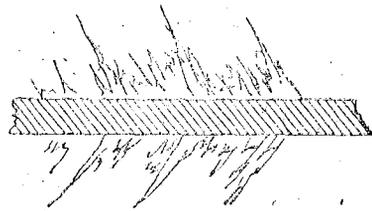
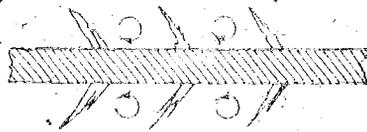


Рис. 2. Вероятная схема последовательного образования круговой изморози при направлении ветра под острым углом или параллельно к проводу.

¹ Отсюда следует, что для наблюдений и учета гололедно-изморозевых отложений, по видимому, нельзя использовать установку в форме стержней; замеры необходимо производить на достаточно длинных проводах, так как стержни, не подвергаясь скручиванию, дают преуменьшенные значения.

оптической ситуации и географического и высотного положения места наблюдения. Последняя зависимость показана ниже более детально. В целом же температура в момент образования обледенения колеблется в широком диапазоне от 0 до -15° в среднегорных районах и до -20° и ниже в более высоких. Наиболее частые случаи связаны, повидимому, с диапазоном температур от 0 до -5 , -6° .

Влажность воздуха в моменты образования обледенений в огромном большинстве случаев очень высока и близка к насыщению.

Ветер во всех случаях изморозеобразований, наблюдавшихся в зонах до 2000 м, имеет более или менее выраженную (в зависимости от узко местного характера рельефа) восточную составляющую. Это обстоятельство связано, конечно, с синоптическими условиями процессов обледенения в Закавказье. Исключение составляют пункты расположения в самом верхнем горном поясе (ст. Алагез—3200 м, ст. Казбеги—3900 м), где процессы обледенения связаны с верхними западными течениями.

Скорости ветров при обледенениях обычно невысокие—чаще 4—5 м/сек. На линии передач Дзворагэс наблюдались и до 10—12 м/сек.

В верхних горных зонах отмечаются обледенения при сильных ветрах (Алагез—до 17 м/сек. Казбеги—до 20 м/сек. и больше).

6. Анализ полевых наблюдений и, особенно, лабораторных опытов подтвердил отмеченную уже в литературе зависимость основных форм отложений (чистый лед и кристаллические элементы) от сочетания температуры и величины осаждающихся капелек. Изменение их в отрицательную сторону (понижение температуры и уменьшение размеров капелек) благоприятствует образованию кристаллических форм, в положительную—образованию форм чистого льда.

Кроме того, существенную роль играют, как уже сказано выше, процессы теплового баланса тела (привод и отвод тепла), особенно в первой стадии гололедно-изморозевого процесса.

Синоптические условия гололедно-изморозевых явлений в Закавказье

Анализ многочисленных случаев осуществления процессов обледенения в Закавказье (и в предгорьях Кавказского хребта на Северном Кавказе) показывает, что осуществление этих процессов здесь происходит в макросиноптических условиях, соответствующих классическому представлению о генезисе явлений гололеда: именно, в зонах тесного расположения изотерм, т. е. в зонах сближения холодных и теплых воздушных масс в полосе температур, лежащих по обе стороны от точки замерзания. Компонентами обычно являются теплые массы, движущиеся с юго-запада, связанные с циклонической деятельностью над Средиземным и Черным морями, и холодные массы, оформленные в антициклональные образования, расположенные над восточной частью Европейской территории СССР, Казахстаном или Западной Сибирью и имеющие тенденцию распространяться к югу и юго-западу.

Зона соприкосновения этих масс чаще оформляется в сближающихся фронтах—теплом или фронте окклюзии с юга и юго-запада (или Запада для Закавказья) и холодном фронте с севера, или северо-востока. Возможны, однако, случаи обледенений при наличии одного лишь фронта. Характер сближающихся масс: теплой—теплая полярная, реже тропическая; холодной—холодная полярная или арктическая.

В Закавказье под влиянием горного рельефа, и в первую очередь Кавказского хребта, синоптические условия явления обледенений приобретают весьма четко выраженный характер: перед началом процесса Закавказье занято относительно теплой, достаточно влажной, неустойчивой воздушной массой. Обычно отмечается наличие окклюзии или теплого фронта или волнового возмущения. Сдвигающийся к югу и юго-востоку антициклон в восточной части Европейской территории СССР или Казахстане дает гребень на Каспийское море. В результате массы холодного воздуха (свежего полярного, реже арктического), огибая массив Кавказ-

ского хребта, с востока¹ проникают через Апшерон в Закавказье, распространяясь на запад более или менее далеко по долине р. Куры, и сближаются с более теплыми и влажными массами воздуха, занимающего Закавказье. В зоне соприкосновения этих масс (иногда вторжение с востока оформляется в виде холодного фронта) возникают явления конденсаций и осадков элементов этих конденсаций в горных зонах в форме изморози (реже гололеда).

Такова макроситуация процесса в наиболее типичном виде. Место осуществления процесса обледенения, его продолжительность, интенсивность и другие особенности обуславливаются сочетанием микросиноптических процессов² с особенностями рельефа. В настоящий момент эти процессы еще не могут считаться вполне выясненными.

Описанные процессы обуславливают гололедно-изморозевые явления в зонах до 2000 м и несколько выше. В верхней горной зоне (3000—4000 м) процессы обледенения вызываются иными моментами и более подробно нами здесь не рассматриваются.

Физико-географические факторы гололедно-изморозевых явлений в Закавказье

Сопоставление данных наблюдений, синоптического анализа и анализа тех воздействий, которые оказывает рельеф местности на синоптико-метеорологические процессы, позволяет сделать следующие выводы:

1. Характерная особенность явлений горных обледенений заключается в резко выраженной локализации как в отношении высотных уровней, так и в отношении различных форм рельефа.

2. Нижняя граница наиболее частого и имеющего практическое значение (по интенсивности) образования изморози лежит в условиях Закавказья на высоте 1000—1200 м над уровнем моря.

Ниже изморозь или не наблюдается вовсе, или наблюдается редко, имея ничтожные размеры. Выше 1000—1200 м процессы образования изморози усиливаются, однако на высотах около 2000 м и выше вновь ослабевают, исключая те места, где узко местные условия рельефа благоприятствуют восходящим токам воздуха. Здесь имеет место увеличение изморози и выше 2000 м.

3. Влияние собственно рельефа выражается весьма разнообразно в зависимости от характера и сочетания наклона поверхности и экспозиции в отношении гололедонесущего потока; значительную роль играет также взаимное расположение хребтов: наиболее интенсивные отложения образуются на склонах, непосредственно воспринимающих удар потока; на склонах лежащих за такими хребтами „ширмами“ отложения значительно ослабевают.

Важно отметить, что эффект распространения явлений обледенения зависит иногда даже от весьма незначительных различий и характера рельефа (микрорельефа) даже близко расположенных участков. Это обстоятельство в значительной степени затрудняет возможность интерполяции и экстраполяции при составлении гололедных характеристик отдельных районов и, тем самым, усложняет само проектирование линий передач.

4. Совокупность всех полученных выводов и соображений позволила наметить пути и методы районирования территории Закавказья в гололедно-изморозевом отношении.

Для такого районирования прежде всего необходимо выработать систему показателей, которая по существу, должна включать в себя два элемента: частоту (повторяемость) явления и его интенсивность (максимальную). И тот и другой

¹ Мощность этого потока не более 2000 м, чаще 1000—1500.

² Термин „микро“ употребляется нами здесь условно по сравнению с „макро“ процессами, охватывающими обширный естественный синоптический район Европы и западной части Азии.

Элемент при настоящем состоянии материалов (данные систематических наблюдений метеорологической сети отсутствуют) может быть дан только ориентировочно.

В основу принятых нами градаций были положены показатели повторяемости, характера и величины отложения применительно к тому эффекту, которые имеют эти показатели для линий электропередач, с присоединением сюда характеристик, сопровождающих метеорологические явления. Такие градации являются, конечно, условными, однако удовлетворяя интересам энергосистем (пока что главного потребителя составляемых отчетов и характеристик), могут быть полезными и для других отраслей народного хозяйства и легко видоизменены в зависимости от объекта.

5. Выделено 7 районов различного характера обледенения по следующей схеме:

I. Районы, в которых явления гололеда или изморози не наблюдаются вовсе или наблюдаются очень редко и очень незначительной интенсивности.

II. Районы, в которых явления отмечаются спорадически; условно повторяемость принята в среднем один случай¹ за год и меньше. Форма отложений обычно односторонняя—очень слабый гололед² с толщиной стенки 1—2 мм или изморозь в виде чисто скелетчатых форм (иглы с незаполненными промежутками) не более 1—2 см в ширину, с ничтожным удельным весом порядка 0,1; температура 0—5°; ветер не более 4—5 м/сек.

Географически такие районы расположены, обычно, в нижних зонах долин Восточной Грузии, приблизительно на высоте 700—900 м; в Западной Грузии несколько выше.

III. Районы, в которых явления изморози наблюдаются ежегодно или почти ежегодно, но не имеют большой продолжительности (1—2 дня). Условно повторяемость принята порядка 1—2 случая за год.

Форма—преимущественно изморозь с более или менее тесно расположенными кристаллами, большей частью в виде „бороды“, шириной 2—4 см и удельным весом 0,2—0,3; температура обычно от 0 до —7°; ветер 5—6 м/сек.

Географически такие районы располагаются в высотном поясе долин—от 900, 1000 до 1200 м.

IV. Районы, в которых явления изморози отмечаются ежегодно,—условно 2—3 случая за год.

Форма—преимущественно изморозь (иногда на гололедной основе). И достаточно уплотненная: удельный вес 0,4—0,6, чаще в форме „бороды“ с длиной до 6 см; температура до —10°; ветер до 7 м/сек.

Обычно эти районы располагаются в еще более высоких зонах (1200—1400 м) на склонах долин и высоко расположенных плато.

V. Районы, в которых явления изморози являются обычными. Условно повторяемость принята в широком пределе—от 4 до 10 случаев за год, иногда с значительной продолжительностью—до 5 дней и больше.

Форма—очень уплотненная изморозь (развитая 3-я стадия) с высоким удельным весом до 0,5—0,6, чаще односторонняя с шириной до 8—10 см, но нередко и круговая; температура может наблюдаться до —10, —15°; ветер до 10 м/сек.

Районы эти располагаются по верхним зонам хребтов (выше 1400 м) при благоприятных условиях натекания гололедонесущих потоков.

VI. Районы с большой повторяемостью и интенсивностью явлений; условная повторяемость от 10 и более случаев за год.

Форма³—изморозь, преимущественно круговых форм, сильно уплотненная, с удельным весом до 0,7, обычно в результате вторичных процессов (4-я стадия), и размерами более 10 см (стенка); температура предположительно —15° и ниже; ветры могут иметь скорости до 15 м/сек. и выше.

¹ Случаи могут включать и более одного дня подряд.

² Между частотой явления и его интенсивностью существует хорошо выраженная, но еще не изученная прямая зависимость.

³ Непосредственных замеров для этих районов, к сожалению, не имеется. Характеристика дается ориентировочно, по визуальным данным и литературным аналогиям.

Географически такие районы располагаются в верхних зонах хребтов (выше 1500—1600 м) при особо благоприятном расположении в отношении гололедо-несущих потоков.

VII. Районы с особым характером образования и отложения твердых осадков. Эти районы (обычно не составляющие сплошного пояса) расположены в самой верхней зоне Большого Кавказа. Осаждение возможно в потоках разных направлений, преимущественно западных. Характерны длительность и исключительная частота—до 50 и больше случаев за год, низкие температуры, доходящие -30° , и ветры большой силы—свыше 20 м/сек. В результате огромные (иногда до десятков дециметров) скопления отложений, преимущественно в форме очень уплотненной изморози со вторичными изменениями.

6. Само районирование производилось комплексным методом, путем последовательного наложения на карту показателей, характеризующих изучаемое явление.

К таким показателям были отнесены, кроме непосредственных данных по гололедным и изморозевым явлениям, также данные по туманам.

Поскольку непосредственные показатели по обледенению чрезвычайно скудны, отрывочны и отсутствуют для большей части территории Закавказья, весьма существенным показателем явились данные по туманам.

Сама методика использования этих последних данных была следующей: так как все имеющиеся практическое значение случаи обледенения имели место внутри облачных масс (туманов), по всем метстанциям были отобраны случаи (дни) с туманами за 5-летний период—за месяцы XI—III включительно¹. Для всех случаев выписаны сопровождающие их температуры, направление и сила ветров. Далее отобраны случаи, когда температура воздуха была равной, или ниже нуля и, наконец, из числа этих последних отобраны все те случаи, когда сопровождающий ветер в данном пункте имел восходящую составляющую (и особенно восточную).

Число и повторяемость таких случаев дало очень важную ориентировку для получения характеристики повторяемости явлений обледенения.

Метод построения карты районирования осуществлялся следующим образом:

На карте внутри площадей очерченных изогипсами, соответствующими высотным зонам наиболее благоприятным для развития явлений твердых отложений, выделялись районы с расположением рельефа, наклоном и экспозицией, благоприятными для восходящих гололедо-несущих потоков. На получившуюся, таким образом, карту географического распределения потенциальной вероятности процессов обледенения, как на фон, накладывались последовательно данные непосредственных гололедных замеров и наблюдений, выводы по указанной выше обработке туманов, данные синоптического анализа и, наконец, некоторые косвенные показатели; важную роль могут иметь данные по распределению грозových явлений и их интенсивности².

На основе всех данных были построены карты районирования, имеющие, конечно, пока еще весьма приближенный характер.

Вопросы прогноза гололедно-изморозевых явлений в Закавказье

Выше мы указывали уже на то важное обстоятельство, что макросиноптические условия осуществления гололедно-изморозевых явлений носят в Закавказье (и на Северном Кавказе) весьма определенный характер. Это обстоятельство в высокой степени облегчает возможность предсказания этих явлений, особенно

¹ Для районов, выделенных нами в VI и VII категории, брались все месяцы года.

² Как известно, существует внутренняя связь между районами осуществления грозových и гололедных процессов (см., например, Лир З. С. Синоптические условия гололеда в Европейской части СССР, Журн. Геофизики и метеорологии, т. IV, в. I, 1927).

по линии долгосрочного прогноза. Достаточно вспомнить, что как раз условия осуществления гололедных процессов легли в основу метеорологической разработки долгосрочных прогнозов (см. „Основы метода долгосрочных прогнозов“, изд. 1945 г. под ред. Пагава).

В условиях Кавказа гололедно-изморозевые явления часто, особенно интенсивные, отмечаются при наличии одного из 3 основных процессов: так называемого процесса западного гололеда, процесса восточного гололеда и процесса, оканчивающегося карским воздействием.

Все эти макроситуации освещены детально и хорошо разработаны в отношении смены отдельных фаз. Необходимо, однако, отметить, что в ряде случаев в Закавказье имеют место обледенения, обусловленные иными, еще не полностью исследованными ситуациями.

Опыт детального анализа отдельных случаев обледенения и опыт составления пробных прогнозов в зиму 1944/45 г. дают все основания считать, что методы долгосрочного прогноза основных типов, приводящих к гололеду в районах Европейской территории СССР, могут быть приложены и для прогнозов явлений обледенения в Закавказье.

Намечается важная роль для возникновения гололеда на Кавказе процесса вхождения в конце подготовительного периода ядра высокого давления по ультраполярной оси. Однако прогноз за месяц недостаточен еще для уточнения времени и места осуществления явления и его интенсивности.

Как мы указывали выше, требуется дальнейшее, более глубокое исследование процессов местного характера. На основе такого уточнения может быть осуществлено предсказание на более короткое время как методами долгосрочного, так, в особенности, и краткосрочного прогноза.

В целом перспективы прогноза гололедно-изморозевых явлений в Закавказье могут считаться весьма благоприятными, что, конечно, должно сильно облегчить подготовку и осуществление мероприятий по борьбе с явлением и ликвидации его последствий.

Вопросы дальнейшего изучения гололедно-изморозевых явлений в горных условиях

Важнейшими мероприятиями в этом направлении мы считаем следующие:

1. Необходимо поднять на соответствующую высоту массовые наблюдения на метеорологической сети, особенно в горных районах. В настоящее время состояние этих наблюдений совершенно неудовлетворительно: они или не ведутся вовсе (в большинстве случаев) или ведутся несерьезно, не систематически и ненадежно. Необходимо разработать инструкции с учетом требований практики. Следует вести учет не только наличия явления, но и его характера и размеров, хотя бы визуально на специальных установках с проводами¹.

На высокогорных станциях (Казбеги, Эльбрус, Алагез) должны проводиться специальные наблюдения над явлениями обледенения.

2. На функционирующих линиях передач и на линиях связи, подвергающихся обледенению, должен быть организован систематический и надежный учет явлений.

3. При проектировании линий передач, проходящих через предположительно угрожаемые по гололеду и изморози районы, должно быть организовано предварительное изучение явления на специальных установках.

4. Необходимо организовать в одном из горных районов Закавказья с резко выраженными и типичными процессами изморозеобразования горно-изморозевую станцию для всестороннего изучения явления.

¹ Такие наблюдения могут быть разработаны в чрезвычайно простой форме с дешевыми установками, но дающими достаточно надежные практические результаты.

5. Необходимо начать изучения явления „мокрого снега“, имеющего важное значение для ряда районов, например, для Западной Грузии. Здесь это явление, выражающееся в оседании липкого, мокрого снега (при температурах около 0°) на проводах и опорах, может вызвать в сочетании с сильными ветрами (от 15 м/сек. и выше) опасную перегрузку. В нашем распоряжении имеется ряд сведений об авариях по линиям связи, вызванных этим явлением.

Явление „мокрого снега“ совершенно не изучено ни со стороны механизма его происхождения, ни в отношении его структуры, географического распределения и эффекта воздействия.

6. Следует организовать синоптическое изучение явления изморозеобразования в отношении уточнения макропроцессов и, в особенности, в отношении местных особенностей и микросиноптических положений, одновременно с организацией дачи прогнозов (долгосрочных и краткосрочных) для наиболее подверженных обледенению районов.

7. Нужно объединить работу всех учреждений, организаций и лиц, изучающих явления обледенения в горных условиях (Академии Наук, Гидрометслужбы Управления гражданской авиации и министерств: путей сообщения, здравоохранения, связи, электростанций и др.) каким-либо центром, связывающим эти организации.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГОЛОЛЕДНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

На материале наблюдений за обледенением проводов, проводившихся на Бугульминской гидрометстанции в течение сезонов 1940—1941 и 1941—1942 гг., рассматривается изменчивость получаемых количественных характеристик. Измерения диаметров производились штанген-циркулем с точностью до 1 мм, а объема воды, получающейся при растапливании осадка, взятого с 1 пог. м длины провода, с точностью до десятых долей 1 см³.

Одной из задач определения диаметров отложений, меняющихся по величине вдоль провода, является характеристика кажущегося объема осадка на проводах.

Рассмотрим менее постоянный по своим диаметрам и плотности элемент — изморозь. При существующем методе инструментальных наблюдений большой и малый диаметры находятся из трех замеров, сделанных на расстояниях 25, 50, 75 см от концов рабочей части (метровые участки проводов). Для исключения экранирующего влияния столбов мы пользовались при анализе замерами на проводах, направление нормали к которым отличалось не больше чем на 45° (на 2 румба) от направления ветра. При угле в 45° брались данные с проводов обоих направлений.

Влияние экранирования могло бы особенно заметно отразиться на материалах наблюдений июня 1940—1941 гг. на 15-метровой площадке, где провода натягивались между столбами по линии, соединяющей их оси (центры сечения).

За сезон 1940—1941 гг. имелись материалы сравнительных наблюдений на 15-метровом гололедном станке над отложениями на трех парах взаимно перпендикулярных 5-миллиметровых железных цилиндрических проводов; на каждом направлении (N—S и E—W) было натянуто между четырьмя столбами 3 отрезка провода, являвшихся один как бы продолжением другого. Замеры диаметров производились в трех сечениях на каждом проводе. В сезоне 1941-42 гг. нами были организованы специальные наблюдения на 6-метровом гололедной станке не по трем, а по пяти сечениям; дополнительные измерения производились на концах рабочей части проводов: в первом сезоне число серий замеров—18, во втором—36.

Сравнение средних большого D и малого d диаметров для трех проводов одного направления (назовем их a , b , c) дают следующие результаты: среднее квадратичное отклонение средних для каждого провода диаметров от общей средней (D и соответственно d) из всех девяти сечений оказывается равным

$$\sigma(D_{a,b,c}) = 1,3 \text{ мм},$$

$$\sigma(d_{a,b,c}) = 1,0 \text{ мм}.$$

Среднее квадратическое отклонение, отнесенное к среднему из 9 сечений, оказывается равным

$$\sigma\left(\frac{D_{a,b,c} - D}{D}\right) = 0,052,$$

$$\sigma\left(\frac{d_{a,b,c} - d}{d}\right) = 0,055.$$

Коэффициенты асимметрии

$$c_s = \frac{\Sigma(x-1)^3}{n \cdot \sigma^3},$$

для

$$x_1 = \frac{D_{a,b,v}}{D}$$

$$x_2 = \frac{d_{a,b,v}}{d}$$

соответственно равны

$$c_s(x_1) = 0,2$$

$$c_s(x_2) = 0,0.$$

Последние характеристики нами определялись в силу невозможности априорно допустить применимость симметричной кривой распределения. Во втором случае c_s достаточно мал, чтобы можно было без значительной погрешности применить функцию Крампа.

В первом случае асимметрия представляется большей. Однако, учитывая малое число случаев и скачкообразное изменение сумм

$$\Sigma(x-1)^3$$

при переходе от провода к проводу

$$(\Sigma(x_a - 1)^3 = -1294, \Sigma(x_b - 1)^3 = -648, \Sigma(x_c - 1)^3 = +3830),$$

мы полагаем возможным и здесь воспользоваться симметричной кривой распределения Гаусса. Заметим, что например, для вероятности относительного отклонения $\pm 0,1$ при $\sigma = 0,05$ и $c_s = 0,2$ как кривая Пирсона III типа, так и функция Крампа дают одну и ту же величину

$$p\left(0,9 < \frac{d}{d} < 1,1\right) = 0,95,$$

а для вероятности отклонения в пределах $\pm 0,05$ имеем

$$p\left(0,95 < \frac{d}{d} < 1,05\right) \approx 0,70$$

по таблице Фостера¹ и $p = 0,68$ по кривой Гаусса; обе величины также достаточно близки друг к другу. Можно ожидать, что кривая Пирсона III типа окажется более полезной при рассмотрении кривых распределения около средних, найденных не для каждого случая, а за определенный интервал времени, например, за полугодие, сезон и т. п.

Основываясь на полученных характеристиках и принимая

$$\sigma(D_j) = \sigma(d_j) = 1,3 \text{ мм},$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta D_j}{D}\right) = \sigma\left(\frac{\Delta d_j}{d}\right) = 0,055,$$

находим с какой точностью следовало бы давать среднюю из трех величину диаметра для отдельного провода, чтобы она совпадала со средней из девяти замеров

¹ С. И. Рыбкин. Таблица Фостера „Метеор. и гидр.“, № 1, 1938.

Таблица 1

x	D_3	D_5	d_3	d_5	$\frac{D_3 - D_5}{D_3}$	$\frac{D_5 - D_3}{D_5}$	$\frac{D_3 - D_5}{D_5}$	$\frac{D_3 - D_5}{D_3}$	$\frac{d_3 - d_5}{d_3}$	$\frac{d_5 - d_3}{d_5}$	$\frac{d_3 - d_5}{d_5}$
Средняя из 36 измерений	16,16	16,06	11,89	11,88	0,000	0,10	0,008	0,000	0,000	0,01	-0,004
$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$	1,27	1,43	1,26	1,20	0,021	0,51	0,028	0,099	0,098	0,51	0,041
$c_s = \frac{\sum (x - \bar{x})^3}{n \cdot \sigma^3}$	0,0	-0,2	0,1	0,2	-3,0	1,6	1,4	0,3	0,0	0,3	-1

на всех трех проводах с вероятностью $p = 0,9$. Аргумент функции Крампа при этом равен $z = 1,645$, откуда $(D_j - D) = \pm 1,645 \times \sigma = \pm 2,14$ мм,

$$\frac{\Delta D}{D} = \pm 1,645 \times \sigma = \pm 0,091.$$

Усиливая полученный результат можно считать, что средний диаметр с точностью $\pm 2,5$ мм, а относительное отклонение его с точностью $\pm 10\%$ отражает истинную среднюю величину, причем большие отклонения встречаются меньше, чем в 1 случае на 10 замеров.

Приведенный анализ относится к трем различным проводам и характеризует не только точность самих замеров, но и возможные колебания в величине отложения на соседних, параллельно натянутых проводах. Последний фактор исключается при рассмотрении материала наблюдений сезона 1941/42 гг. Обозначим через d_3 и d_5 соответственно отдельно взятые замеры диаметра в одном сечении для средней из трех и пяти замеров, а через \bar{d}_3 и \bar{d}_5 эти средние.

Результаты статистической обработки представлены в табл. 1.

Величины c_s не имеют устойчивого характера; для разностей средних из трех и пяти замеров большого диаметра коэффициент асимметрии колеблется около 1,5. Нас не интересует определение вероятности отклонений в зависимости от их знака, также как достижение большой точности в оценках, почему будем исходить из симметричного закона распределения.

Если квадратичные отклонения отдельных замеров от средних из трех и пяти колеблются около 1,2—1,4, мало отличаясь от таковых для отклонений средних диаметров на параллельных проводах (от $\sigma \bar{D}_{a,b,v} = 1,3$), то отклонения \bar{D}_3 от \bar{D}_5 и соответственно \bar{d}_3 от \bar{d}_5 оказываются в 2,5 раза меньшими.

Полагая полученные средние из трех и пяти замеров независимыми друг от друга, можно считать их взаимное квадратичное отклонение заведомо большим такового для разности между средней из трех и истинной средней.

Примем его равным

$$\sigma(x_3) = \sigma(\bar{D}_3 - \bar{D}_\infty) = \sigma(\bar{d}_3 - \bar{d}_\infty) = 0,5 \text{ мм},$$

$$\begin{aligned} \sigma\left(\frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_\infty}{x_\infty}\right) &= \sigma\left(\frac{\bar{D}_3 - \bar{D}_\infty}{D_\infty}\right) = \\ &= \sigma\left(\frac{\bar{d}_3 - \bar{d}_\infty}{d_\infty}\right) = 0,04. \end{aligned}$$

Тогда, имея в виду, что

$$\frac{\sigma(x_3)}{\sigma(x_5)} = \sqrt{\frac{3}{5}} = 0,775,$$

находим

$$\sigma(\bar{x}_3) = 0,5 \times 0,775 = 0,387 \approx 0,39 \text{ мм}$$

$$\sigma\left(\frac{x_3 - x_5}{x_5}\right) = 0,04 \times 0,775 = 0,031.$$

Отсюда следует, что с вероятностью $p = 0,9$ можно считать предельное отклонение

$$|\bar{x}_3 - \bar{x}_\infty| < 1,645 \cdot \sigma \approx 0,83 \text{ мм};$$

$$|\bar{x}_5 - \bar{x}_\infty| < 0,61 \text{ мм};$$

$$\left| \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_\infty}{\bar{x}_\infty} \right| < 0,07;$$

$$\left| \frac{\bar{x}_5 - \bar{x}_\infty}{\bar{x}_\infty} \right| < 0,05.$$

При существующей методике наблюдений, округляя в сторону увеличения, можно считать с вероятностью

$$p \approx 0,95, \text{ что } |\bar{x}_3 - \bar{x}_\infty| < 1 \text{ мм}$$

и с вероятностью

$$p \approx 0,94, \text{ что } |\bar{x}_3 - \bar{x}_\infty| < 0,075 \cdot \bar{x}_\infty,$$

где x — порядок величины средних диаметров.

В связи с последним соотношением целесообразно указать, что графическое сопоставление $\frac{\bar{d}_3 - \bar{d}_0}{\bar{d}_3}$ с \bar{d}_0 на основании данных 1940/41 г. показало отсутствие связи между обеими величинами, т. е. точность определений не зависит от величины диаметра.

Интересно отметить также графически установленную неплохую зависимость между \bar{d}_3 и \bar{D}_3 , определяемую приближенно соотношением $\bar{D} = k \cdot \bar{d}$.

Для сезона 1940/41 г. $k \approx 1,2$, для сезона 1941/42 г. $k \approx 1,4$.

Во втором случае разброс точек несколько больше. Уменьшения дисперсии следует ожидать при построении зависимости отдельно для намерзаний (форм осадка, связанных с намерзанием очень мелких капелек) и сублимата (отложений, возникающих в результате процессов сублимации). Возможно, что особенно в первом случае также наметится прямая связь со скоростью ветра.

Перейдем теперь к рассмотрению возможной точности определения среднего поперечного сечения — величины промежуточной для вычисления удельного веса изморози. Будем предполагать, что сечение определяется только величиной большого и малого диаметров. Если отложение имеет форму контура поперечного разреза, например, в виде круга, эллипса, треугольника, прямоугольника, то площадь сечения будет пропорциональна произведению диаметров. Зависимость

коэффициента пропорциональности от формы поперечного сечения пока учитывать не будем.

Представляется интересным остановиться на 3 основных вопросах:

1. Как отличаются средние произведения на близко расположенных, подвешенных на одной высоте параллельных проводах, от общего среднего произведения диаметров?

2. Как отличаются произведения средних диаметров от средних произведений диаметров из того же числа случаев?

3. Как различаются произведения средних из трех и пяти диаметров?

На основании наблюдений сезона 1940/41 г. имеем (табл. 2).

Таблица 2

Среднее из 3 произведений для провода \overline{Dd} .			Среднее из 9 произведений $\overline{\overline{Dd}}$	Среднее квадратичное отклонение $\overline{\overline{Dd}}$ от $\overline{\overline{Dd}}$
a	b	c		
341,09	301,13	320,15	330,79	76,3

Отсюда с вероятностью 0,9 можно сказать, что отклонения средних произведений из трех диаметров для отдельных проводов от общей средней для трех проводов не превышают $1,645 \times 76,7 = 125 \text{ мм}^2$.

Полагая $D = d = 10 \text{ мм}$, находим приращение диаметров, которое вызывает данное предельное изменение произведения равным $\pm 5 \text{ мм}$; на 5-миллиметровом проводе, считая $D = d = x$ предельное приращение Δ диаметра, будет меньше $\pm 1 \text{ мм}$ при диаметрах

$$x > (125 - \Delta^2) : 2\Delta = 62 \text{ мм},$$

возрастая с уменьшением D .

Относительное отклонение средних произведений для отдельных проводов от средних для трех проводов, отнесенное к последнему, равно

$$\sigma = 0,091 \text{ и } \sigma_s = 0,5.$$

Следовательно, здесь предельное отклонение оказывается порядка $\pm 15\%$ от среднего произведения из 9 диаметров, одинаковое как с учетом асимметрии, так и без нее. Отклонение произведений средних диаметров от средних произведений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Среднее отклонение	$\frac{\sum x}{n}$	-0,42	-1,15	-0,56
Средний квадрат отклонений	$\sqrt{\frac{\sum x^2}{n-1}}$	76,8	2,4	1,3

Бросается в глаза значительное отклонение произведений средних диаметров для отдельных проводов от среднего произведения диаметров всех трех проводов. Порядок его величины близок к σ' из табл. 2. Отклонения произведений осредненных по трем проводам диаметров от $\overline{\overline{Dd}}$ как и σ' для разности между произведениями средних из пяти диаметров от среднего произведения тех же пяти диаметров, измеренных на одном проводе, значительно меньше.

Предельная с вероятностью $p = 0,9$ погрешность, возникающая при замене среднего произведения на произведение средних из того же числа замеров диаметров, оказывается равной: для девяти замеров на трех разных проводах

$$\Delta = 1,645 \times 2,4 = 3,95 \approx 4 \text{ мм}^2;$$

для 5 замеров на 1-миллиметровом проводе

$$\Delta = 1,645 \times 1,3 = 2,14 \text{ мм} \approx 2,1 \text{ мм}^2.$$

Принимая даже наибольшую величину $\Delta = 4 \text{ мм}^2$ при $D = d = 10 \text{ мм}$ для такого изменения произведения потребуется приращение диаметров только на $\pm 0,2 \text{ мм}$. Существующая методика измерений диаметров с округлением диаметров до целых миллиметров вполне допускает замену среднего произведения на произведение средних диаметров. Возникающие при этом погрешности значительно ниже таковых, связанных с округлением.

Существенным оказалось расхождение между произведением средних диаметров из двух и пяти замеров $(\bar{D}_3 \cdot \bar{d}_3 - \bar{D}_5 \cdot \bar{d}_5)$, в среднем из 36 серий замеров равная $x = -7,00$ при

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum_1^{36} (\bar{D}_3 \cdot \bar{d}_3 - \bar{D}_5 \cdot \bar{d}_5)^2}{35}} = 51,6 \quad c_s = -5,2.$$

Здесь и асимметрия велика. Очень близкие к приведенным результаты получаются и для $\bar{D}_3 \cdot \bar{d}_3 - \bar{D}_5 \cdot \bar{d}_5$, где

$$\bar{x} = -7,55,$$

$$\sigma' = 51,9,$$

$$c_s = -5,1.$$

Средняя разность здесь значительно меньше квадратичного отклонения. Физически нет оснований полагать обоснованным существование постоянной систематической неслучайной разности между величинами, полученными из трех и пяти замеров (искажающее воздушный поток влияние столбов, к которым подвешены провода, мы в значительной мере считаем исключенным отбором проводов в соответствии с направлением ветра; если экранирование заметно сказывалось, то следовало бы ожидать больших величин для средних из трех, определяемых по сечениям, находящимся дальше от столбов). Поэтому полученную асимметрию мы будем относить только к данной совокупности. Полученное квадратичное отклонение σ' , если

$$\frac{\sum \bar{D}_3 \cdot \bar{d}_3}{n} = \frac{\sum \bar{D}_5 \cdot \bar{d}_5}{n_{n \rightarrow \infty}} = (\bar{D} \cdot \bar{d})_{\infty}$$

следует рассматривать как квадратическое отклонение разности двух произведений каждое из которых имеет дисперсию соответственно

$$\sigma_3^2 = \frac{\sigma^2}{3},$$

$$\sigma_5^2 = \frac{\sigma^2}{5},$$

где σ — среднее квадратическое отклонение отдельного замера от генеральной средней при $n \rightarrow \infty$. Считая

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_3^2},$$

имеем

$$\sigma_3 = \frac{\sigma'}{\sqrt{1 + \frac{3}{5}}} = 0,79 \cdot \sigma',$$

откуда $\sigma_3 = 0,79 \times 52 = 41 \text{ мм}^2$. Предельное с вероятностью $p = 0,9$ отклонение произведений средних из 3 диаметров от идеальной средней для данного отрезка провода составляет $\Delta(\overline{D_3} \cdot \overline{d_3}) = 68 \text{ мм}^2$.

Считая сечение провода с осадком круговым $D = d = x$, находим предельные погрешности в величине диаметров, соответствующие приведенному значению для произведений (табл. 4).

$x \text{ мм}$	5	10	20	50	100
$\pm \Delta x \text{ мм}$	4,6	3,0	1,6	0,7	0,4

Таблица 4

Исход из предельного относительного отклонения произведения для отдельных проводов

$$\Delta \left(\frac{(\overline{D} \cdot \overline{d} - \overline{D \cdot d})}{\overline{D \cdot d}} \right) = 0,15$$

около среднего для трех проводов, заведомо большего такового относительно средней для данного провода величины, легко найти связанные с этим предельные ошибки в вычислении плотности изморози.

Очевидно

$$\rho_2 - \rho_1 = \frac{M}{\rho} \left(\frac{s_1 - s_2}{s_1 \cdot s_2} \right) = -\rho_2 \cdot \Delta = -0,15 \cdot \rho_2,$$

т. е. абсолютная величина относительной погрешности для плотности та же, что и для сечения s (произведений диаметров), если пренебрегать ошибками в измерении M .

Нами произведена приближенная оценка последней величины:

1. На 5-миллиметровый цилиндрический железный провод наносился тонкий слой воды, удерживающийся на нем в силу капиллярности. Количество затрачиваемой на смачивание поверхности провода воды легко находилось по разности уровней в бюретке. Из шести повторно проведенных определений, приведенная к 1 м длины провода, потеря

$$П_{II} = 0,34 \text{ см}^3.$$

2. Из бюретки сливалось определенное (от 5 до 10 см^3) количество воды в служившую для сбора и растапливания изморози ванночку, размером 13×18 (ванночка для проявления пластинок), откуда после смачивания (покачиванием) всей поверхности дна и нижней части бортиков вода опять сливалась в бюретку. Потеря в ванночке, средняя из 5 повторностей, оказалась равной

$$П_{в} = 0,58 \text{ см}^3.$$

3. Из бюретки вода (5 — 10 см^3) сливалась в стандартный крашенный железный метровый футляр для переноски проводов с осадком. После смачивания внутренней поверхности футляра водой, последняя переливалась в ванночку 13×18 , откуда опять сливалась в бюретку.

Суммарная потеря в футляре и ванночке оказалась в среднем из 5 определений равной

$$P_{\phi} + P_{в} = 1,90 \text{ см}^3,$$

откуда следует, что потеря в футляре составляет

$$P_{\phi} = 1,90 - 0,58 = 1,32 \text{ см}^3.$$

Суммарная потеря на провода, в футляре и ванночке составляет

$$P_{\Sigma} = 0,34 + 0,58 + 1,32 = 2,24 \text{ см}^3.$$

На крученых и большего диаметра проводах потери должны быть еще выше.

При встречающихся в Бугульме массах отложений (5—10 г/м) неучитывание потерь воды приводит к занижению плотности на 50—25%.

Подробного исследования для гололеда на материалах наблюдений Бугульмы провести не удалось, в силу отсутствия больших отложений и вообще сравнительно малого числа случаев гололедообразований. Использованы данные за период II—IV 1941 г. (всего 10 случаев) аналогичные таковым для изморози.

Среди замеров, произведенных на 5-миллиметровом цилиндрическом проводе, значительная часть диаметров оказывается равной 5 мм, т. е. толщина слоя осадка составляет доли миллиметра. Поэтому ограничимся приведением небольшой сводной табл. 5 с некоторыми средними величинами и их отклонениями от средних для 3-х проводов.

Таблица 5

x	$\overline{\overline{D}}$	$\overline{\overline{d}}$	$\left(\overline{\overline{D}} - \overline{\overline{D}}\right)$	$\left(\overline{\overline{d}} - \overline{\overline{d}}\right)$	$\frac{\overline{\overline{D}} - \overline{\overline{D}}}{\overline{\overline{D}}}$	$\frac{\overline{\overline{d}} - \overline{\overline{d}}}{\overline{\overline{d}}}$	$\overline{\overline{Dd}}$	$\left(\overline{\overline{Dd}} - \overline{\overline{Dd}}\right)$	$\frac{\overline{\overline{Dd}} - \overline{\overline{Dd}}}{\overline{\overline{Dd}}}$
$\frac{\Sigma x}{n}$	7,66	5,94	0,00	0,00	0,00	0,00	48,01	0,00	0,00
$\sqrt{\frac{\Sigma x^2}{n-1}}$	—	—	0,36	0,24	0,045	0,039	—	3,1	0,065

Как и следовало ожидать, учитывая малые размеры и близкие к цилиндрической формы гололедных отложений, колебания отдельных средних из трех замеров около таковой для девяти замеров (на трех проводах) здесь меньше, чем это имело место для изморози.

Заключение

1. Для сравнения средних из трех диаметров изморози на различных проводах с вероятностью $p > 0,9$ можно считать, что отдельные средние не уклоняются от общей средней данного уровня и направления больше чем на $\pm 2,5$ мм или на $\pm 10\%$ от самой средней величины.

2. С вероятностью $p \approx 0,9$ можно считать, что отклонения средних произведений диаметров из трех сечений для 1. провода не будут отличаться от среднего произведения для нескольких проводов данного направления на данном уровне больше, чем на 125 мм^2 или на $\pm 15\%$ от самой величины среднего произведения.

3. Замена среднего произведения диаметров на произведение средних диаметров из того же числа замеров дает ошибку не превышающую таковой, связанной с округлением величины диаметров до целых миллиметров.

4. При определении массы отложений растапливанием счищаемой с проводов в ванночку или футляр изморози (гололеда) с последующим сливанием воды в бюретку, необходимо учитывать потери жидкости, связанные со смачиванием поверхности проводов, ванночки и футляра.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ НОМОГРАММА ДЛЯ ПРОГНОЗА ФРОНТАЛЬНОГО ГОЛОЛЕДА ПО МЕСТНЫМ ДАННЫМ

Своевременный прогноз гололеда имеет большое значение для нормальной эксплуатации действующих линий связи и электропередач.

По прогнозу гололеда, до настоящего времени, сделано еще очень мало. Работами Лир, Мультиановского и Абрамович установлены те синоптические ситуации, которые могут привести к образованию гололеда. Однако детальной проверки повторяемости гололеда при этих ситуациях проведено не было. В результате этого мы не имеем метода прогноза гололеда, хотя он и является крайне необходимым.

В этой работе мы пошли по другому пути. Мы пробуем формулировать основные положения нового метода прогноза гололеда, основанного не на изучении синоптических условий его образования, а только на значениях метеорологических элементов во время образования гололеда.

Для осуществления этого метода потребовалось, прежде всего, провести обработку всего имеющегося архива наблюдения над гололедом для установления тех зависимостей, которые могли бы лечь в основу нашего метода прогноза гололеда.

Метод построения номограммы

Для того, чтобы построить эмпирическую номограмму для прогноза гололеда нами была проведена обработка архива Главной геофизической обсерватории по инструментальным наблюдениям над гололедом. При этой обработке определялась средняя скорость ветра во время нарастания гололеда с учетом продолжительности его нарастания и интенсивности образовавшегося отложения. Всего было обработано 165 случаев (табл. 1).

Таблица 1.

Определение средней скорости ветра во время нарастания гололеда

Интенсивность в мм	Продолжительность в часах						
	до 3	3—6	6—9	9—12	12—15	15—18	18—21
до 5	4,57 (56)	4,69 (22)	5,25 (8)	3,40 (11)	2,80 (5)	1,50 (1)	—
5—10	4,61 (21)	4,64 (14)	3,28 (4)	7,66 (2)	4,57 (3)	—	—
10—15	7,50 (1)	8,25 (4)	9,50 (2)	10,25 (4)	—	—	8,50 (2)
15—20	4,25 (2)	—	6,25 (2)	—	—	8,0 (1)	—
Средняя скорость ветра	5,40 (80)	5,80 (40)	6,01 (16)	7,10 (19)	6,08 (6)	4,70 (2)	—

Число, поставленное в скобках под скоростью ветра, показывает количество обработанных случаев нарастания гололеда.

Из таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшая повторяемость нарастаний гололеда приходится на гололеды малой и средней интенсивности и продолжительности. Непрерывное нарастание гололеда свыше 15 час. представляет собой очень редкое явление.

2. Средняя скорость ветра возрастает при увеличении интенсивности отложения и имеет максимум при 9—12-часовой продолжительности нарастания.

Зная среднюю скорость ветра и среднюю продолжительность процесса нарастания гололеда, можно определить длину того воздушного столба, который прошел через провод в то время, в течение которого на нем нарастало гололедное отложение. Если мы примем за высоту столба среднюю величину малого диаметра гололедного отложения, а ширину его будем считать равной 1 м, то мы можем определить приблизительно объем воздуха, прошедший через обледенелый провод. Разделив вес образовавшегося гололеда на прошедший объем воздуха, мы получим влагосодержание и 1 м³ воздуха.

$$m = \frac{1000 Q}{d \cdot l \cdot v \cdot t} \text{ г/м}^3,$$

где m — количество воды в граммах на 1 м³ воздуха; Q — вес в граммах гололеда на 1 пог. м провода с диаметром в 5 мм, d — малый диаметр гололедного отложения в миллиметрах, l — длина провода равная 1 м, v — средняя скорость ветра в м/сек. при нарастании гололеда, t — средняя продолжительность нарастания гололеда в секундах.

Результаты вычислений по этой формуле приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влагосодержание в грамме в 1 м³ воздуха при нарастании гололеда

Большой диаметр		Вес	Малый диаметр	Продолжительность нарастания в часах				
предельный	расчетный			1,5	4,5	7,5	10,5	13,5
До 5	3	12	5	0,097	0,031	0,017	0,018	0,017
5 — 10	7	35	5	0,281	0,093	0,079	0,025	0,031
10 — 15	12	58	8	0,180	0,054	0,028	0,019	—
15 — 20	17	80	12	0,290	—	0,039	—	—

Полученные количества воды вполне соответствуют тому влагосодержанию, которое наблюдается в тумане при отрицательных температурах.

Вспомним теперь, что фронтальный гололед образуется при выносе теплого воздуха на охлажденную поверхность и, следовательно, по Абрамович, он может наблюдаться при наличии теплого фронта или фронта окклюзии по типу теплого фронта. При наличии теплого фронта, т. е. в области соприкосновения теплой и холодной воздушных масс мы имеем, при отрицательных температурах, процесс конденсации водяного пара с образованием переохлажденной воды. Капельки переохлажденной воды, увлекаемые током воздуха, могут попасть на какое-либо препятствие, на котором они и закристаллизуются с образованием гололеда.

Для того, чтобы определить количество образовавшегося гололеда, нам необходимо определить то количество воды, которое возникло в атмосфере при конденсации водяного пара в области теплого фронта. Мы предположили, что это количество будет равно тому количеству водяного пара, которое сконденсируется при смешении равных объемов двух воздушных масс, начальные температуры которых соответствуют температурам масс по обе стороны теплого фронта. Считаем также, что наши смешиваемые воздушные массы имеют относительную влажность равную 100%. Весовое количество насыщенного водяного пара при температуре

смеси, которую мы принимаем равной средней температуре смешиваемых масс, всегда меньше чем сумма весовых количеств насыщенного водяного пара в обеих массах. Разность между этими количествами и будет то количество водяного пара, которое сконденсируется в воду.

Следовательно, вес образовавшейся воды при смешении двух, насыщенных водяным паром воздушных масс, можно определить по формуле:

$$\frac{s_1 + s_2}{2} - s_3 = m,$$

где m —количество воды в граммах на 1 м^3 воздуха, s_1 и s_2 —количество насыщенного водяного пара в граммах в смешиваемых воздушных массах, s_3 —количество насыщенного водяного пара в граммах в смешанной массе.

Результаты расчета по этой формуле приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Количество сконденсированной воды в граммах, выделяющееся при смешении воздушных масс в 1 м^3 с разной температурой и 100% относительной влажностью

Температура смеси	Разность температур двух воздушных масс							
	10	9	8	7	6	5	4	3
— 6	0,21	0,16	0,13	0,11	0,08	0,05	0,04	0,03
— 5	0,21	0,19	0,15	0,11	0,08	0,05	0,04	0,03
— 4	0,23	0,20	0,15	0,12	0,08	0,06	0,04	0,03
— 3	0,24	0,20	0,16	0,12	0,08	0,07	0,04	0,03
— 2	0,25	0,21	0,16	0,13	0,09	0,07	0,04	0,03
— 1	0,27	0,24	0,17	0,13	0,09	0,07	0,04	0,03
0	0,28	0,24	0,17	0,15	0,09	0,07	0,05	0,03

Определив величину влагосодержания для нарастания с определенной интенсивностью и продолжительностью, находим в табл. 3 полученное значение. Так как одно и то же значение влагосодержания может встретиться в табл. 3 по крайней мере в двух столбцах, то мы определяем значение наибольшей разности температур для вычисленного влагосодержания. Найдя таким образом разности температур для всех градаций нарастания гололеда, в зависимости от их интенсивности и продолжительности, мы можем составить табл. 4.

Таблица 4

Наибольшие разности температур двух воздушных масс при нарастаниях гололеда разной интенсивности и продолжительности

Интенсивность в мм	Продолжительность в часах			
	до 3	3—6	6—9	9—12
до 5	6	4	1	2
5—10	10	6	6	1
10—15	9	5	3	1
15—20	11			

Теперь, если мы по ординате отложим данные разностей температур двух воздушных масс, а по абсциссе средние скорости ветра, то на этих координатных осях мы можем отложить значения обоих переменных, взятые из табл. 1 и 4. Каждая точка на нашей номограмме будет отвечать определенной интенсивности и продолжительности нарастания гололеда и характеризоваться скоростью ветра и разностью температур, взятых из этих таблиц (рис. 1).

Нанеся все имеющиеся точки на график, мы соединяем крайние из них между собой и получаем некоторое, ограниченное с двух сторон, поле. При этом из ограничивающих кривых выпадает точка, соответствующая скорости ветра в $3,28 \text{ м/сек.}$, но так как она выпадает одна, то мы ее при построении номограммы не учитываем.

Проверка номограммы для прогноза гололеда

В результате проделанных построений мы получили поле, ограниченное с двух сторон. Ограничение этого поля сверху и снизу не является особенно необходимым. Снизу его можно без всяких новых построений ограничить на уровне разности температур в 1° . При такой разности температур уже, обычно, не представляется возможным сколько-нибудь строго провести линию раздела теплой и холодной воздушной массы. Отсутствие значительной разности температур сильно снижает и вероятность образования гололеда и его интенсивность. Верхняя граница номограммы зависит от наибольшей встречающейся разности температур двух воздушных масс. Практически верхнюю границу можно провести на уровне разности температур, равной 10° .

Вся номограмма представляет собой не что иное, как графическое изображение наиболее часто повторяющейся скорости ветра при образовании гололеда. Из номограммы видно, что фронтальный гололед образуется в условиях, когда скорость ветра лежит в пределах от 5 до 8 м/сек., т. е. данная скорость ветра является наиболее часто повторяющейся при гололеде. Это вполне соответствует тому, что наблюдается на практике. Повышенная скорость ветра встречается сравнительно редко при таких теплых фронтах, которые вызывают образования гололеда. Уменьшение повторяемости ветра с меньшей скоростью при гололеде (что также вполне соответствует экспериментальным данным) связано с постепенным распылением теплого фронта, что выражается в уменьшении разности температур двух воздушных масс по обе стороны фронта.¹

Перейдем теперь к методу использования построенной номограммы.

Для проверки соответствия появления гололеда тем условиям, которые определяются номограммой, нужно установить метод выбора входящих в номограмму переменных. Так как фронтальный гололед образуется при выносе теплого воздуха, то пользоваться номограммой можно только тогда, когда имеется теплый фронт или фронт окклюзии по типу теплого фронта.

Для определения разности температур необходимо, прежде всего, определить температуру каждой воздушной массы в отдельности. Это определение ведется по рабочей синоптической карте. Из срочных значений температур определяют наиболее часто повторяющуюся температуру на расстоянии 120—150 км от линии теплого фронта. Определив, таким образом, температуру каждой воздушной массы, находят их разность, которую откладывают по ординате номограммы.

После этого определяют наиболее часто повторяющуюся скорость ветра в непосредственной близости фронта, т. е. в области не большей, чем по 150 км по обе стороны фронта. Эту величину откладывают по абсциссе номограммы.

Если точка, определяемая обоими найденными значениями, лежит внутри очерченного поля, номограммы, то это говорит о возможности появления гололеда в том районе, для которого определялись разность температур и скорость ветра. Если точка лежит вне поля номограммы, то появление гололеда в этом районе мало вероятно.

Так как и температуры, и скорости ветра меняются вдоль линии фронта, то поэтому предсказывать гололед можно в том районе, где их изменения незначительны. В результате этого, при наличии сильно протяженного фронта, для предсказания гололеда вдоль всей его длины необходимо на номограмме строить точки, определяемые разностью температур и скоростью ветра, взятых в разных местах вдоль линии фронта. Экспериментально было установлено, что гололед можно предсказывать в среднем на участке фронта, длиной в 600—800 км. При этом площадь района, лежащего за линией фронта, внутри которого может предполагаться гололед, не превышает 25—30 тыс. км².

¹ Номограмма дает возможность предсказывать гололед в области, ограниченной изотермами 0 и -6° .

Номограмма была проверена на архиве из 200 рабочих синоптических карт Центрального института прогнозов.

Для проверки выбирались те карты, на которых было отмечено наличие теплового фронта на Европейской территории СССР при температурах воздуха за

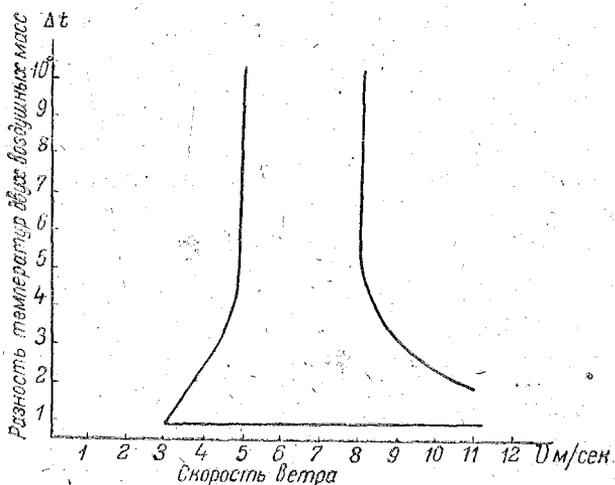


Рис. 1. Номограмма для прогноза фронтального гололеда.

линией фронта, в теплой массе от 0 до -6° . После этого определялась необходимая для номограммы скорость ветра, как это было выше указано. По номограмме определялась возможность появления гололеда в той области (за линией теплового фронта), для которой была определена как температурная разность, так и скорость ветра.

Если номограмма указывала на возможность появления гололеда и гололед действительно был зарегистрирован на карте или, наоборот, номограмма указывала на невозможность образования гололеда и гололед не был указан на карте, то мы считали, что метод оправдался. В противоположных случаях мы считали, что метод не оправдывал себя.

В результате всего было установлено, что процент оправдываемости гололедного прогноза, данного нашим методом, составляет около 80%.

О ПРИБОРНОМ НАБЛЮДЕНИИ НАЗЕМНОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ (изморозь, иней, твердый налет, гололед)

1. Согласно „Руководству метстанциям II разряда“ наблюдатели должны отмечать наличие наземного обледенения и его силу по трехбалльной шкале. Предметы, служащие для наблюдения осадения льда, не стандартизованы: наблюдателю представляется для этой цели широкий выбор случайно окружающих его предметов. Между тем, в зависимости от свойств тела, изменяется не только величина ледяного осадения, но и возможность его появления. Так, например, если в поле зрения наблюдателя находится массивный хорошо теплопроводный предмет (неоштукатуренное кирпичное толстостенное здание, гранитный постамент, цистерна с горючим, чугунная деталь и т. п.), то явление твердого налета зимой отмечается часто; когда же вблизи наблюдателя ничего, кроме деревянных построек нет, то твердый налет вообще не может быть отмечен.

Любящий природу внимательный наблюдатель осмотрит десяток различных предметов и сумеет обнаружить даже слабые или завуалированные следы явления; ненаблюдательный метеоролог легко пропустит явление даже средней силы, так как „Руководством“ не предусмотрен каждодневный осмотр какого-то определенного предмета.

Этим недостатком методики наблюдений видов наземного обледенения объясняется несравнимость данных по наземному обледенению соседних станций, так хорошо знакомая климатологам: попытки районирования явлений инея и твердого налета ни к чему не приводили. Невозможна и проверка отметок явления по сравнению наблюдений соседних станций.

Указанное положение привело к тому, что наблюдения, особенно над твердым налетом и инеем, полностью не проверяются и совершенно не обрабатываются климатологически. Они складываются в архив и единственным их уделом является забвение. Между тем, не исключена большая практическая значимость даже таких явлений, как твердый налет. На заре метеорологических явлений изморозь не представляла интереса. Развитие длины проводов связи привело к изменению взгляда на изморозь: она стала важным метеорологическим элементом. Твердый налет, разрушающий поверхностный слой предметов и ускоряющий их общее разрушение, также ждет своей переоценки. Если в задачу наблюдательной метеорологии входит отметка всех явлений атмосферы, вне зависимости от величины их практической важности сегодня или предполагаемой завтра, то отмечать все виды наземного обледенения необходимо. А если необходимо наблюдать, то нужно это делать по единой схеме на одинаковых предметах так, чтобы в дальнейшем можно было бы использовать материал для различных целей.

Причиной отсутствия единой методики наблюдения наземного обледенения является его неизученность. Такое яркое явление, как гололед, получило современное определение лишь в „Инструкции“ 1908 г. Твердый налет лишь с 1928 г. был выделен из изморози и получил свое теперешнее название. Даже в последнем

издании „Руководства“ имеется ряд неточностей и ошибок в описании и объяснении видов наземного обледенения.

В нашей основной метеорологической литературе, как правило, наблюдается смешивание различных видов наземного обледенения, их неправильное описание и объяснение. За границей принята другая классификация явлений, несравнимая с принятой у нас: там приняты 3 разновидности изморози и более суженное определение твердого налета. Наряду с необходимостью стандартизации наблюдений наземного обледенения следует уточнить и расширить его описание в „Руководстве“, чтобы наблюдатель смог обходиться без запутывающей этот вопрос метеорологической литературы. Стандартизация и приборность наблюдений в значительной мере избавляют наблюдателя от ошибок за счет непонимания физики, или неточного определения явления.

2. Стандартизация наблюдения, т. е. ограничение произвола наблюдателя в выборе объектов и показателей явления, приводит с неизбежностью к прибору. Принципами прибора для отметки наземного обледенения всеми метеорологическими станциями II разряда должны быть: 1) простота работы, 2) дешевизна, 3) чувствительность к явлениям и 4) безотказность. Прибор не должен вносить никаких усложнений и заметных добавлений к обычной работе наблюдателя. Он должен лишь систематизировать наблюдение наземного обледенения, направить внимание наблюдателя на один предмет—прибор, вместо многих случайных.

Для возможности быстрого внедрения прибора на многие сотни станций он должен быть прост и дешев в изготовлении. Прибор должен отмечать явление приблизительно тогда же, когда оно появляется на каких-либо естественных предметах, т. е. чувствительность прибора должна быть достаточной. Показательность прибора не должна прерываться от влияния других атмосферных явлений; прибор должен работать всегда при самом элементарном уходе. Можно изобрести много различных приборов для отметки наземного обледенения (ниже излагаются основы одного из них). Остановимся вначале на физическом обосновании схемы отдельных его приемников.

3. Приемником изморози в этом приборе служит вертикально натянутая и жестко закрепленная проволока, поперечником около 0,05 мм и длиной 15 см. Выбор подобного приемника объясняется тем соображением, что на нем не должно быть осадений инея и твердого налета. Кроме того, чувствительность предмета к осадению на нем изморози увеличивается с уменьшением его толщины. Все это достигается уменьшением поверхности и массы предмета до минимума, путем выбора для этой цели тонкой струны. Для отметки направления оседания изморози и ее суммарной величины удобен стержень из проволоки в 4—5 мм. Оба они, струна и стержень, должны обвеваться воздухом равномерно со всех сторон, т. е. быть симметричными в горизонтальной плоскости, что и достигается их вертикальным расположением. Одновременно эти приемники не должны ничем закрываться от ветра, т. е. должны возвышаться над ближайшими предметами, быть на ветру.

4. Приемником гололеда служат тонкие горизонтальный и вертикальный пруты, открытые для ветра и выпадающих осадков. Длина прутов должна быть достаточной для очистки части каждого из них с целью определения процесса нарастания гололеда. Горизонтальный прут, для возможности равноценного приема гололеда при любом направлении ветра, должен иметь форму круга, квадрата, крестовины и т. п. Проволока должна быть прокрашена для предохранения ее от ржавления.

5. Приемником инея служит деревянная, окрашенная в темный цвет доска покрывающая основание прибора; так как наибольшая влажность бывает у поверхности земли при радиационном охлаждении почвы, то доска должна горизонтально располагаться вблизи поверхности земли.

6. Приемником твердого налета служит железная бочка с мазутом, или масляная кирпичная кладка, возвышающаяся над землей на $1\frac{1}{2}$ — 2 м. Наиболее чувствительным приемником является бочка с мазутом (нефтью), так как углеводороды от-

личаются большой теплоемкостью и конвективной теплопроводностью. Однако этот приемник является несколько искусственным (если не считать цистерн, самолетов и т. п.). Кирпичная кладка более подходит к обычным зданиям. Учитывая толщину стен построек (около $1/2$ м), получим размер кладки в виде куба в $1/4$ м³. Приемник твердого налета должен свободно обвеваться воздухом, не заноситься снегом, т. е. значительно возвышаться над почвой, как и другие приемники метеорологических явлений. Для большей теплопроводности кирпичная кладка должна быть плотной, из тяжелого кирпича.

Приемники инея, изморози и гололеда можно сочетать вместе. Приемник же твердого налета должен быть удален от них во избежание его теплового воздействия.

Один из вариантов объединения приемников инея, изморози и гололеда представляет собой „Ледоскоп-4“ (рис. 1). Он состоит из вертикального стержня *А*, сделанного из круглого железа диаметром 12 мм и длиной 146 см. Нижний конец стержня *А* имеет нарезку и ввинчивается на 6 см в забитый вровень с землей кол. Верхняя часть стержня имеет горизонтальное отверстие *К* диаметром 6 мм, проходящее на 2 см от верхнего обреза стержня. Вдоль оси стержня просверлено сверху отверстие *Л* до соединения с горизонтальным, т. е. глубиной 2 см. Нижняя часть этого отверстия на протяжении 1 см — нарезная. В горизонтальное отверстие вставляется прямолинейный конец *Б*, изогнутой в кольцо оцинкованной проволоки *В*. Диаметр проволоки 5 мм, кольца *В* — 20 см; оно располагается в горизонтальном положении с центром на оси вертикального стержня *А* и удерживается так завинчивающейся сверху вертикальной оцинкованной г-образной проволокой *Г* диаметром 5 мм. Вертикальная часть этой проволоки равна 17 см (на 2 см она вставляется в отверстие стержня), горизонтальная — 105 мм, причем на расстоянии 5 мм от конца сделана бородка. Между горизонтальным кругом и бородкой натягивается вольфрамовая нить *Д* диаметром около 0,03 мм. На вертикальный стержень надеваются центральным отверстием две деревянные доски *Е* размером 30 × 30 см². Нижняя употребляется только при снежном покрове. Верхняя употребляется всегда и имеет по своим концам 4 деревянные пробки длиной 4 см, на которых она (как столик) и ставится на почву или нижнюю доску.

Иней на вертикальной нити не образуется, чем автоматически достигается разделение инея и изморози, которая легче всего возникает на этой нити. Суммарные изморозь и гололед наблюдаются на горизонтальном кольце и вертикальной части оцинкованной проволоки. Иней наблюдается на поверхности доски. Никаких измерений на приборе не делается, наблюдения только качественные, что является первой ступенью приборных наблюдений.

Изложенное здесь предложение заключается в стандартизации глазомерных наблюдений.

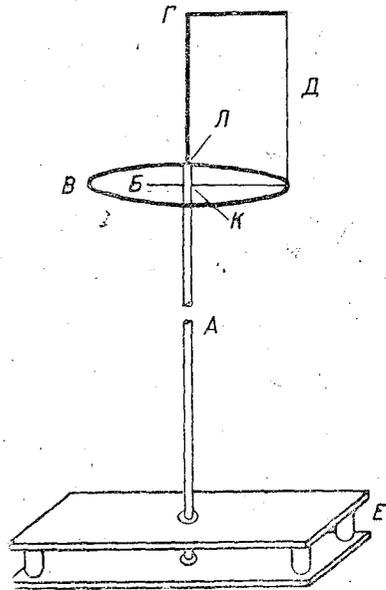


Рис. 1. Ледоскоп-4.

К ВОПРОСУ О ФОРМЕ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ИЗ КАПЕЛЬНО-ЖИДКОГО ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО ТУМАНА

При наличии переохлажденных туманов (при низких температурах) на проводах образуется рыхлый белый осадок, расположенный с наветренной стороны. Под микроскопом прекрасно видна зернистая структура отложения, состоящего из ветвей намерзших друг на друга ледяных ядрышек. В дальнейшем будем именовать такой осадок термином „наморозь“¹. Поперечное сечение провода с осадком на морози имеет вид, показанный на рис. 1. Характерно наличие желобка, тянущегося

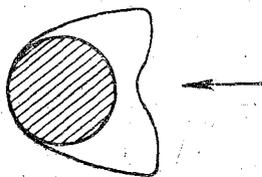


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения провода с отложением на нем „наморози“ (обледенения).

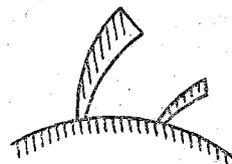


Рис. 2. Схематическое изображение наружной поверхности обледеневшего провода с перообразными отложениями на „наморози“.

гося в средней части наветренной бахромы. Отдельные элементы, составляющие массу осадка, имеют вид пушистых перышек или изогнутых навстречу ветру конических столбиков (рис. 2). Сечение элементов возрастает от места прикрепления к проводу по направлению к периферии.

Если ветер во время отложения был параллелен проводу, то вместо односторонней бахромы возникает осадок на всей поверхности. При этом вид отдельных элементов не меняется, а места прикрепления их к проводу обычно бывают расположены дальше одно от другого.

Объяснение ветвистой структуры наморози и наличия желобка на наветренной бахромке основано на рассмотрении соотношения между массовыми и поверхностными силами, действующими на капельку. Чем меньше радиус частиц, тем меньше будут влиять на их движение инерционные силы сравнительно с трением о воздух. Следовательно, очень мелкие капельки должны иметь траектории, близкие к траекториям движения воздуха. Лишь в местах с очень большой кривизной линий тока воздуха капельки будут приближаться к препятствию, обтекаемому потоком. Для мелких частиц вероятность столкновения с гладкой поверхностью провода мала, так как радиус кривизны сравнительно велик. Небольшие шероховатости

¹ По принятой в „Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам“ (вып. 3) терминологии, рассматриваемое автором твердое отложение воды определяется как „изморозь“ (Прим. ред.).

вызывают резкое искривление траектории движения воздуха. В этих местах центробежная сила, уменьшая кривизну траекторий капельки, может заставить ее коснуться выступающей точки. Если переохлаждение элементов тумана достаточно велико, то мгновенно замерзшая капелька образует новый выступающий на прежней шероховатости элемент — ледяное зернышко. Аналогично и в других местах провода улавливаются зародыши наморози, на которых впоследствии нарастают ветви отложения со все большей скоростью.

Если в начале процесса большая плоскость осадка наблюдается в точке провода, перпендикулярной направлению ветра (серповидное сечение отложения), то большие скорости обтекания, ближе к касательным относительно ветра участкам поверхности провода, вызывают быстрейший там рост элементов наморози. В результате ветви осадка, расположенные дальше от середины бахрамы, развиваются лучше центральных, обуславливая появление желобка.

При более высоких температурах, когда контактирующие капли успевают перед замерзанием более или менее расплыться, мелкие переохлажденные капельки образуют гололед лентообразный, благодаря более быстрому росту навстречу ветру отложения на боковых поверхностях провода; поперечное сечение осадка напоминает прямоугольник, сопряженный с полуокружностью в тыловой части (рис. 3).

Если наличие наморози совершенно точно говорит о существовании капельно-жидких туманов в течение процесса образования осадка, то возможно, что изучение угла раскрытия веерообразной бахрамы, в сочетании с наблюдением скорости ветра, и размера частиц, позволит в дальнейшем судить о величине капелек тумана только по виду наморози, без сложных микроскопических или оптических наблюдений. Следует ожидать возрастания угла раскрытия веера с уменьшением размеров капель, при прочих равных условиях.

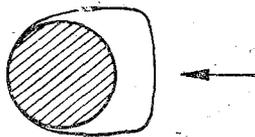


Рис. 3. Поперечное сечение провода с отложением гололеда.

СВОЕОБРАЗНЫЙ ВИД ВРЕДНОГО НАЗЕМНОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ

Работникам связи, железнодорожного транспорта и авиации известно вредное действие обледенения, вызываемого намерзанием мокрого снега [1, 2, 3], однако, до сего времени это явление не было самостоятельно описано. Для восполнения этого пробела и приводятся ниже некоторые сведения о явлении намерзания снега, собранные из литературы, наблюдений автора в Ленинграде за зиму 1945/46 г. и путем обработки наблюдений метеорологической сети.

Налипание снега происходит, как показывают наблюдения, только при положительной температуре. Ниже 0° снег может смерзаться лишь при огромных давлениях (при -1° требуется 125 кг/см^2). Если бы в условиях реальной атмосферы такое смерзание снежинки с поверхностью предмета произошло, то все же снежинки свалились бы под действием ветра и собственной тяжести из-за ничтожно малой площади соприкосновения с предметом. Сухой снегопад (при отрицательной температуре) никогда не остается на проводах связи диаметром 4 мм, не говоря о более тонких. Только тающие снежинки, падая на такие предметы, не сдуваются с них, а плотно облепляют. В зависимости от величины положительной температуры, быстроты ее изменения во времени, скорости ветра, величины снежных хлопьев и густоты снегопада облепление провода происходит с той или другой интенсивностью. Наиболее благоприятна температура воздуха около $0, +1^{\circ}$, но налипание при обильном крупном снегопаде может быть и при $+5^{\circ}$.

Для возникновения обледенелости необходимо последующее понижение температуры ниже 0° . Именно это явление обледенения, когда снежно-ледяной налет не тает, и будет рассматриваться дальше как своеобразное явление наземного обледенения. Налипание снега при положительной температуре составляет лишь его начальную фазу, дальше которой, правда, явление часто не идет. Эта начальная фаза также представляет собой вредное явление, залепляя сигнальные знаки и т. п., однако, величина отложения тающего снега около 1—2 мм для проводов создает лишь незначительную, не вредную, нагрузку.

Второй фазой этого вида обледенения является замерзание воды налипшего снега при переходе температуры через 0° . Если снегопад прекратился, то на проводах внизу остаются замерзшие капли воды—своеобразный вид прозрачного гололеда; в отдельных местах могут встречаться обледенелые снежинки. Когда же снегопад непрерывно продолжается, то на стекловидную (иногда очень незначительную) основу налагаются слои снежинок все более уменьшающейся обледенелости (когда снег еще был мокрый) и, наконец, на эту очень шероховатую поверхность насыпается, задерживаясь на ней, сухой снег при отрицательной температуре. Однако сильный ветер, сдувая налипающий подмерзающий снег, непрерывно оголяет провода от мокрого снега и пленки воды, так что накопления обледенелого снега не происходит и последующий сухой снег не остается на проводах. На обширных поверхностях, где удерживается и обычный сухой снежный покров, эта фаза развивается и при сильном ветре.

При благоприятных для развития явлений условиях (тихий ветер, густой крупный снегопад и медленный переход температуры через 0°) этот процесс обледенения может дать мощное отложение в несколько сантиметров толщиной. Внешний вид обледенения на проводах напоминает изоляцию из ваты: слой почти равномерно облегал провод, проходящий посредине осадка. Внутреннее строение показывает увеличение плотности льда от весьма малых значений рыхлого снега снаружи до стекловидного льда непосредственно на предмете.

Рассмотрение материалов наблюдений над гололедом метеорологической сети показывает, что намерзание снега встречается реже изморози и гололеда, однако все же довольно часто. Вредность же намерзшего снега во многих случаях превосходит вредность гололеда и изморози. Например, за неполные 1941—1945 гг. метеостанциями Аги-сай (44° с. ш. и 90° в. д.) отмечены 33 случая изморози, 22—гололеда и 10—намерзшего снега (обрывы проводов и т. п.). Из 65 случаев разрушительных было только 3: 2 от снега и 1 от изморози.

В некоторых случаях намерзающий снег может достичь огромных размеров и вызвать катастрофические разрушения. 5/1 1945 г. в Тегеране намерзшим снегом были повалены в садах ели, представляющие там значительную ценность и была нарушена нормальная жизнь города из-за прекращения связи и электроосвещения, вследствие обрыва проводов и валки столбов [4]. 8—9/V 1937 г. в районе Курган-Шумиха, Южно-Уральской ж. д. было сломано 300 столбов и наклонено и повалено до 1200 столбов [3]. В первом случае диаметр отложения доходил до 5 см, во втором—до 8 см. Частота и разрушительность этого явления нашли отражение в народном слове—„снеголом“. Все это убедительно показывает, что пренебрегать явлением намерзания снега нельзя.

Рассмотренное явление еще не получило своего общепризнанного имени. Его называют то снегом [1], то обледенелым снегом [5]. В. Даль в своем словаре мокрый снег именуется рядом терминов в том числе „лепень“. Для результата мокрого снегопада (намерзания его в виде слоя), вызывающего снеголом, он термина не дает. Нам кажется, что близким по духу к терминам В. Даля было бы название для намерзшего снега „налеп“, а его условным знаком для метеонаблюдателей символ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов А. А. Расчет механической части воздушных линий. 1934.
2. Лебедев Н. В. Борьба с обледенением самолетов. 1939.
3. Муретов Н. С. Гололедные образования. 1945.
4. Заморский А. Д. Снег в Тегеране. Природа, № 1, 1946.
5. Методические указания по производству наблюдений над гололедообразованиями на гололедном станке. Гидрометеиздат, 1945.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	2
<i>Бургсдорф В. В.</i> О физике гололедно-изморозевых явлений	3
<i>Андреев Ю. Н.</i> К вопросу о физико-метеорологических условиях образования гололеда	12
<i>Дмитриев А. А.</i> Отложение изморози на проводах в связи с воздействием подстилающей поверхности	20
<i>Базилевич В. В.</i> Влияние микроструктуры тумана на обледенение проводов	34
<i>Балабуев А. Г.</i> Гололедно-изморозевые явления в Закавказье	42
<i>Дмитриев А. А.</i> Оценка точности гололедных наблюдений	52
<i>Андреев Ю. Н.</i> Эмпирическая номограмма для прогноза фронтального гололеда по местным данным	60
<i>Заморский А. Д.</i> О приборном наблюдении наземного обледенения	65
<i>Дмитриев А. А.</i> К вопросу о форме поперечного сечения отложений из капельножидкого переохлажденного тумана	68
<i>Заморский А. Д.</i> Своеобразный вид вредного наземного обледенения	70

10704

Отв. редактор В. В. Базилевич.

Техн. редактор Л. Б. Кононова.

МО 3309 Сдано в набор 16/IV 1947 г. Подписано к печати 11/VII 1947 г. Бумага 70 × 105 ¹/₁₆.
Зн. в 1 печ. л. 70 000. Уч.-изд. л. 7,1. Печ. л. 4,5. Тираж 600 экз. Заказ 1004. Цена 7 руб.

Типография Госфиниздата СССР им. Котлякова, Ленинград, Садовая, 21.