1949 г. Март Т. XXXVII, вып. 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

РОСТ ЧАСТИЦ В ДЫМАХ И ОБЛАКАХ И ОБРАЗОВАНИЕ СНЕГА ИЗ ПЕРЕОХЛАЖДЁННЫХ ОБЛАКОВ

Ирвинг Лэнгмюр)*

Я собираюсь рассказать сегодня о некоторых вещах, относящихся к серии исследований, начатых в ранний период войны и продолжаемых до сих пор. Будучи разнородными по характеру, они составляют, однако, некое единое целое, хотя на первый взгляд это может показаться и не так.

Первая часть наших исследований была начата ещё до нападения на Пирл-Харбор, когда военно-химическое ведомство предложило мне и В. Дж. Шеферу, который работал в качестве моего ассистента, предпринять теоретическое изучение процессов фильтрации в противогазовых фильтрах. В настоящее время в противогазовых масках для поглощения отравляющих газов применяется древесный уголь. Однако уже во время первой мировой войны появилась опасность, что противник использует дымы слабоиспаряющихся ядовитых веществ. Будучи взвешены в воздухе в виде аэрозоля и не являясь газом, дымовые частицы не поглощались бы углём, и для их удаления был бы необходим фильтр типа фильтровальной бумаги. Вопрос, поставленный перед нами, гласил: «Из чего следует исходить при устройстве фильтра, чтобы он по возможности хорошо отвечал своему назначению?» По всей вероятности, мы оказались бы захваченными врасплох, если бы враг решил использовать отравляющие дымы, для которых мы не имели соответствующего фильтра.

Прежде всего перед нами встала задача создания дымов, частицы которых имели бы размеры, наиболее трудно поддающиеся фильтрации. Мы хотели, чтобы дымы были устойчивы, мы хотели измерять их концентрацию и мы хотели измерять размеры частиц. Необходимо было изучить эти факторы. Потребовалась большая предварительная работа, чтобы научиться создавать частицы, однородные по

---

*) Proc. Amer. Phys. Soc., 92, 167 (1948). Доклад, сделанный в Национальной Академии Наук 17 ноября 1947 г. Сокращённый перевод А. Мельниковой.

размерам, выяснить, как измерять их размеры и определять, какое количество вещества проникает через фильтр.

Эта работа продолжалась около года. Мы получили достаточно удовлетворительные теоретические результаты и достигли лучшего понимания того, как следует строить хорошие фильтры. Одновременно мы приобрели много детальных познаний в области создания дымов, которые не испарялись бы, содержали чрезвычайно мелкие частицы — много меньшие, чем в обычных дымах, — и выяснили их оптические свойства. Мы изучали такие вещи, как прохождение газов через тонкие поры, обтекание вокруг волокон и исследовали траектории малых частиц, увлекаемых газом.

Когда работа приближалась к концу (август 1941 г.), было получено сообщение, что немцы используют в больших масштабах дымы для маскировки промышленных объектов. Это были слегка окрашенные дымы. Их видели только с воздуха. Никто не знал, что это такое, но они были очень эффективны. Возник вопрос: не может ли кто-нибудь придумать способ получения белого маскирующего дыма, который мог бы применяться на больших участках для создания защитной дымки от воздушной бомбардировки? Мы с Шефером обсудили этот вопрос и нас заинтересовало, нельзя ли с этой целью использовать тот метод, который мы применяли для получения дымов при испытаниях фильтров. Мы нашли, что наиболее простым способом создания дыма и регулирования размеров его частиц является переведение некоторого количества масла в парообразное состояние. Мы нагревали жирные кислоты и подобные им соединения примерно до 200° С, пропускали над их поверхностью струю воздуха так, что пары их смешивались с воздухом, и затем внезапно охлаждали их путём обдувания большим количеством холодного воздуха. Частички растут в размерах, но внезапное охлаждение, как мы нашли, ведёт к остановке роста частиц на некоторой стадии, вследствие чего образуются частицы очень малых размеров. Мы были очень удивлены, когда обнаружили, что в надлежащих условиях можно получать частицы, исключительно однородные по размерам.

Теперь возникал вопрос: каким образом можно провести соответствующие операции в большом масштабе? Мы предполагали использовать вещества с низкой испаряемостью, нефтяные продукты, возможно, высококипящие смазочные масла или что-либо в этом роде, нагревая их до высокой температуры.

Из наших оптических исследований мы знали, что наилучшим маскирующим действием обладают малые частицы. Они рассеивают более полно и более эффективно, чем большие. Это напоминает рассеяние света молекулами воздуха, создающее голубой цвет неба. Согласно закону Релея, такие частицы рассеивают пропорционально шестой степени их радиуса R. Для больших частиц рассеяние изменяется, как R^2. Оно пропорционально тогда площади поперечного сечения частицы. Если теперь разделить R^6 и R^2 на R^3, которое

пропорционально объёму капельки, то получим меру эффективности данного количества вещества в отношении рассеяния света. Для очень маленьких капелек эффективность растёт как R^3, но для бо́льших частиц она изменяется, как $\frac{1}{R}$, т. е. убывает обратно пропорционально радиусу частицы. Иными словами, должен существовать определённый диаметр частиц, при котором они рассеивают свет наиболее эффективно. Оптимальный диаметр оказался практически равным длине волны рассеиваемого света — около 0,6 μ для видимого света. Это много меньше, чем диаметр частиц, получающихся в других дымовых генераторах, но как раз те размеры, которые мы использовали в наших работах по фильтрации дымов. Наиболее трудно поддаются фильтрации частицы диаметр которых около 0,5 микрона; лучше всего рассеивают свет частицы диаметром 0,6 μ.

Применённый нами принцип состоит в том, что если мы хотим получить малые частицы, мы должны охлаждать пары очень быстро. Осуществить это в больших масштабах довольно затруднительно. Поэтому для создания дымов в больших масштабах необходимо использовать большие скорости. Мы решили выяснить возможности использования наивысшей доступной скорости — скорости звука. Нам нужно выпускать пары масла в атмосферу со скоростью, близкой к скорости звука. Нам нужно создавать в кипятильнике пары под давлением около 0,7 *ат* выше атмосферного и выпускать их через сопло со скоростью порядка 150 *м/сек*. Воздух, окружающий струю испарённого масла, очень быстро смешивается с парами и образует конусообразную струю дыма.

Мы проделали вычисления, которые были весьма элементарны, но привели к существенным результатам. Теория была примерно такова. Очень малые частицы, имеющие диаметр около 1 микрона или менее, обладают высоким внутренним давлением вследствие поверхностного натяжения. Этот эффект иллюстрируется простым опытом, который может быть проделан с двумя мыльными пузырями. Выдувая на одной трубке маленький, а на другой большой пузыри и, соединяя обе трубки вместе с помощью резинового шланга, заметим, что маленький пузырь исчезает, увеличивая размеры большого пузыря. Давление в маленьком пузыре всегда больше, чем в большом. То же самое имеет место в случае капелек. Поверхностное натяжение всегда обусловливает большее давление на единицу площади у меньшей капли. Это означает тогда тенденцию для жидкости испаряться с малых капелек, создавая пары, конденсирующиеся на больших капельках. Тенденция эта уже давно была рассчитана Виллиамом Томсоном, и соответствующее уравнение называется уравнением Томсона. Для капелек интересующего нас размера различие в давлении составляет несколько сотых процента.

Позднее мы узнали, что англичане также интересовались этой проблемой и обсуждали такой механизм роста частиц дыма. Они

также старались создать маскирующие дымы и думали о теории, согласно которой малые частицы должны исчезать, давая пары, конденсирующиеся на больших частицах. Использовав уравнение Томсона, они нашли, что различие в давлении составляет только одну сотую процента и сказали «Это пренебрежимо мало. Давайте забудем об этом и будем искать другой путь».

К счастью, мы пошли в ином направлении. Мы сказали: «Даже если различие в давлении составляет только одну сотую процента, температура высока, поскольку масло нагрето до точки кипения, и действительное приращение давления может быть непренебрежимым. Так как охлаждение происходит за несколько тысячных секунды, этого времени может оказаться достаточным для того, чтобы более мелкие капельки успели испариться даже при различии давлений всего только в одну сотую процента». Сколько времени требуется при таких условиях для испарения малых частиц, исчезновения их и конденсации их паров на больших частицах? Когда мы проделали расчёт, мы нашли, что для этого требуется только несколько тысячных секунды, что действительно близко ко времени, необходимому для смешения вырывающихся из сопла паров с воздухом. Итак, количественно теория дала результаты, находившиеся в соответствии с нашими первыми наблюдениями.

Мы проделали вычисления для паров масла, вырывающихся из сопла данного размера под давлением, скажем, 0,7 *ат*. Как велики должны быть образующиеся при этом частицы дыма? Мы нашли, что если сопло недостаточно мало, частички окажутся слишком большими. В конце концов мы пришли к заключению, что для получения частиц диаметром 0,6 μ следует использовать сопло диаметром 4,8 *мм* при давлении паров 0,7 *ат*. Хотя эти расчёты производились ещё до того, как наши опыты продвинулись достаточно далеко, в настоящее время армия использует именно сопло указанного размера.

Теория была усовершенствована, но по существу это была та же теория, которую мы использовали в связи с нашими опытами по получению дымов для исследования противогазовых фильтров.

Работа продвигалась очень быстро. Сперва мы начали с одним соплом под давлением 0,7 *ат*. При этом расходовалось около 40 литров масла в час. Мы изготовили маленький кипятильник и кипятили смазочное масло при температуре около 452° С, заставляя его пары выходить через сопло со скоростью, близкой к скорости звука. Мы нашли, что при этом получаются чрезвычайно однородные частицы нужных размеров. Это был очень эффективный маскирующий дым.

Один из первых сконструированных нами полевых генераторов показан на рис. 1(*В*). Он представлял собой небольшое, грубо выполненное устройство, испарявшее 40 литров масла в час. С целью сравнительных испытаний с нашим полевым генератором армия при-

слала нам некоторые из своих дымовых генераторов. В них использовалось частичное сгорание минерального масла, создававшее грязный сажистый дым чёрного цвета. Когда наш генератор был принят армией, она прежде всего аннулировала очень большой заказ на эти дымовые генераторы.

Для полевых испытаний нам был нужен большой ветровой туннель. Мы избрали долину Скогари. Она имеет двадцать километров

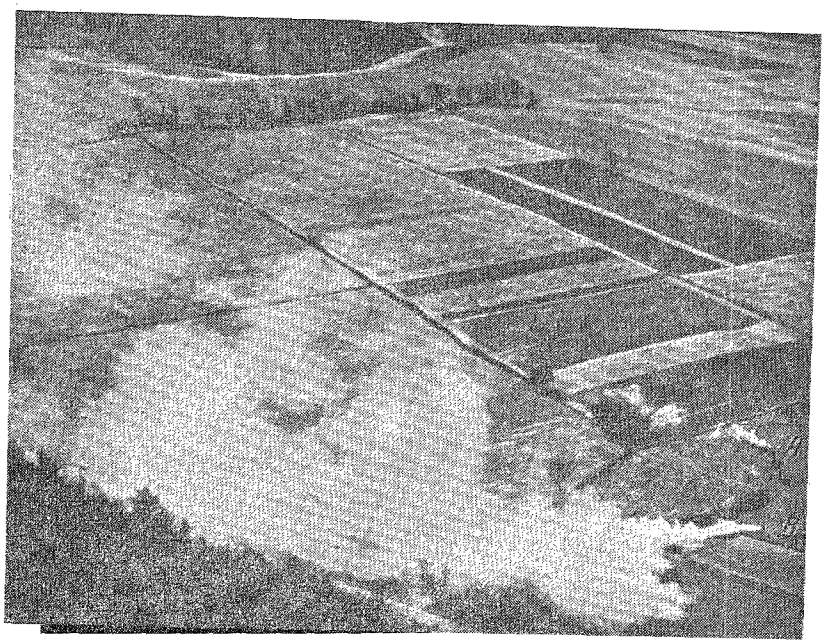

Рис. 1. Сравнение двух дымовых генераторов (долина Скогари, 22 апреля 1947 г.) *А*—армейский дымовой котёл М-1. *В* — дымовой генератор General Electric Research Laboratory. Оба генератора используют одно и то же количество дымообразующей жидкости.

в длину, около двух километров в ширину и ровное дно. С одной стороны её закрывают высокие холмы, до 600 *м* высотой, с другой стороны — крутые обрывы высотой 200 *м*, возвышающиеся над долиной как раз там, где долина изгибается, так что с них можно видеть долину в обоих направлениях.

Мы решили создать в этой долине дым и посмотреть, насколько он будет устойчив и как далеко он будет распространяться. На рис. 1 видна линия дыма (*В*), которая тянется через всю фотографию. Она создана нашим генератором, испаряющим 40 *л* в час. Буквой *А* указан армейский дымовой котёл, который сжигает то же количество масла — 40 *л* в час.

Когда мы по другой фотографии измерили относительную эффективность обоих генераторов, мы нашли, что область покрытия для нашего генератора, в 400 раз больше, чем для лучшего генератора, имевшегося в распоряжении армии. Недавно я узнал, что при создании маскирующих дымов армия использовала один генератор старой конструкции на каждые 8500 $м^2$ маскируемой площади. После того как они получили новые генераторы, они стали их устанавливать по

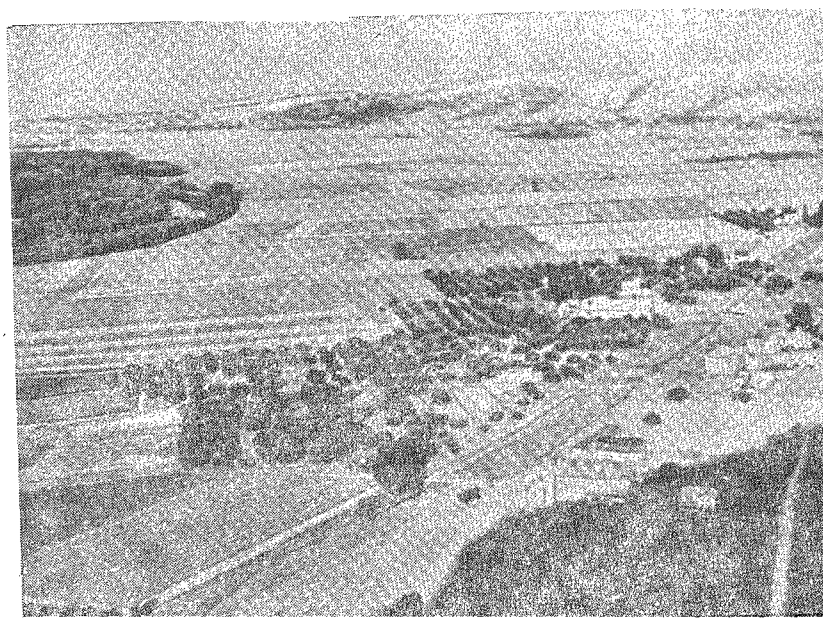

Рис. 2. Долина Скогари.

одному на 3,5 $км^2$ маскируемой площади, что соответствует увеличению площади, маскируемой одним генератором, примерно в 400 раз — близко к значению, полученному в наших первых измерениях.

Улучшение маскирующей способности является результатом использования частиц подходящего размера и применения мало летучего масла. Эффективность армейского котла зависела главным образом от сажистости продуктов сгорания, ибо используемое масло было столь летучим, что большая часть его испарялась.

Рис. 2 представляет собой фотографию долины Скогари, снятую в юго-западном направлении с вершины обрывов, возвышающихся на 200 *м* над долиной. Первые испытания велись у подножья холмов, а дальнейшие — с более мощными генераторами, расходовавшими 400 *л* масла в час, — на участке близ правого верхнего угла фотографии.

Рис. 3 показывает ту же долину, заполненную одним из наших опытных облаков маскировочного дыма. Он даёт наглядное представление о том, что может быть достигнуто с одним генератором в отсутствии сильного ветра.

Значительный интерес представлял день наших заключительных испытаний в присутствии представителей армии и флота. При выяс-

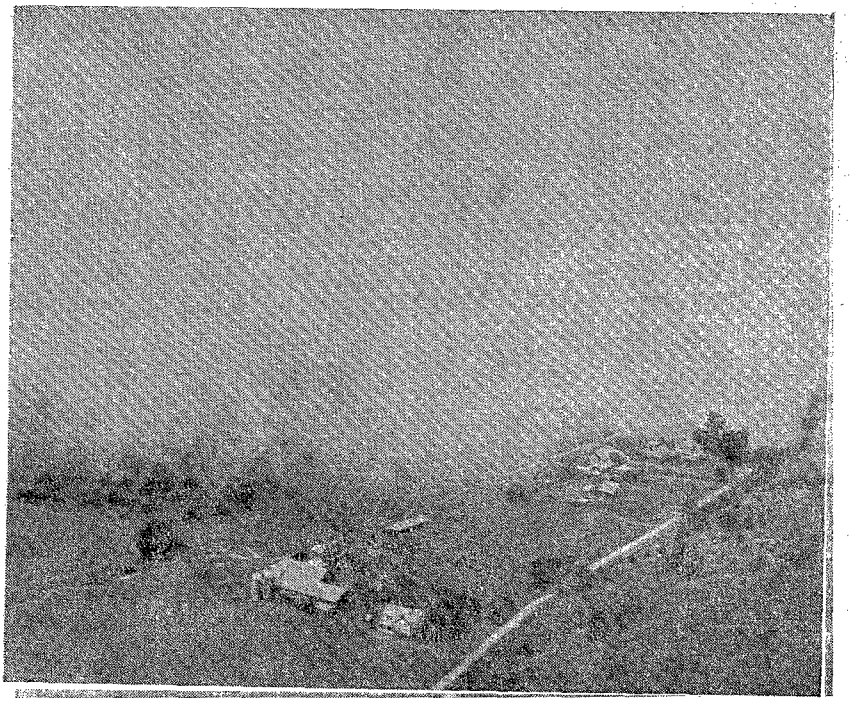

Рис. 3. Фотография сделана с того же места, что и рис. 2, но после того как был пущен в действие дымовой генератор и дым приблизился к точке наблюдения.

нении различных свойств защитного дыма очень многое зависит от погоды. Это было 13 июня 1942 г. Мы прибыли на место испытаний за полчаса до рассвета. Всё обошлось без аварий. Солнце взошло. Небо было безоблачным. Ветер был очень слаб, и за короткое время вся долина заполнилась дымом. После того как мы в течение получаса продолжали дымообразование и вся долина на протяжении 10 или 15 *км* была окутана дымом, поднялся, как мы и надеялись, ветер и разогнал дым. Нас это очень обрадовало, так как показало, что произойдёт в отсутствии благоприятных условий, когда дым

уносится в небо. Очень важно было выяснить, каким образом должно учитываться влияние ветра при проведении маскировочных операций.

Рис. 4. Большой дымовой генератор, использованный 13 июня 1947 г. (долина Скогари).

На рис. 4 показан большой дымовой генератор, испытанный 13 июня. Как только результаты испытаний нашего малого 40-литрового генератора оказались удовлетворительными, было решено начать расширенную программу. Мы заказали генератор, который испарял 400 литров масла в час при 450° С, причём пары выходили под давлением 0,7 *ат* через 10 сопел. После первых же удачных испытаний, проведённых 13 июня, началось массовое производство таких генераторов, продолжавшееся до тех пор, пока не было изготовлено их

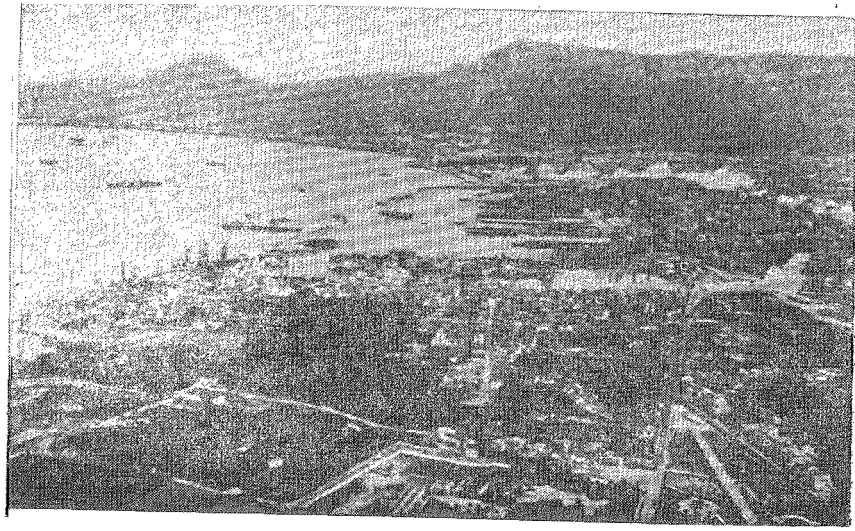

Рис. 5. Гор. Палермо (Сицилия) во время войны, тотчас после включения дымовых генераторов.

много тысяч. Позднее они были использованы в довольно больших масштабах как за морем, так и на Тихом океане. У меня имеется

ряд фотографий, показывающих некоторые из полевых применений таких генераторов.

На рис. 5 приведена фотография города Палермо (Сицилия) в момент, когда дымовые генераторы только что начали работать. На рисунке видно, что генераторы расположены цепью вдоль линии, начинающейся примерно в середине фотографии и идущей направо, а затем налево вверх, огибая центральную часть города. Всего не-

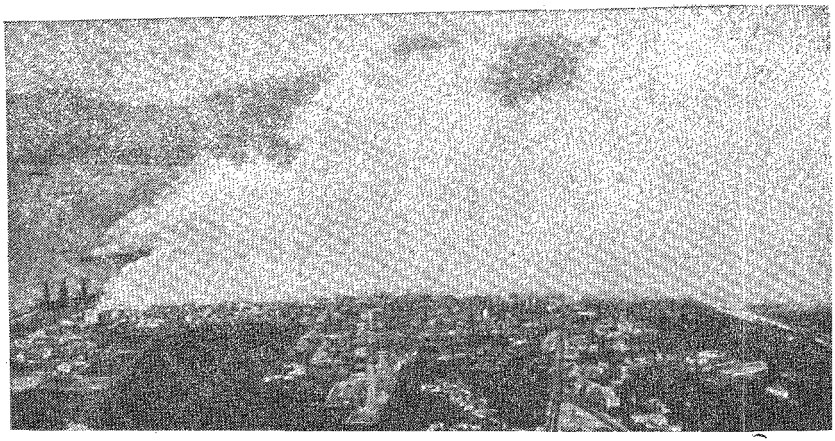

Рис. 6. Тот же вид, что и на рис. 5, несколькими минутами позже, когда дым начал скрывать город.

сколькими минутами позже город выглядел так, как показано на рис. 6. Вся центральная часть города окутана густым дымом. Позднее выяснилось, что защитное действие дыма, создаваемого такими генераторами, оказывается лучше, если дым образуется на некотором расстоянии и приносится к маскируемому объекту ветром уже на некоторой высоте над землёй. Дым тогда располагается не столь низко, чтобы в какой-нибудь мере мешать наземным операциям, но от самолётов земля остаётся полностью закрытой.

Рис. 7 показывает один из генераторов, обслуживающих армию в настоящее время. Генераторы эти более компактны, чем первый; последние образцы ещё меньше.

С тех пор как стали широко использоваться генераторы, испаряющие 400 *л* масла в час, возникла серьёзная проблема снабжения. Я полагаю, что в общей сложности было израсходовано несколько миллионов литров масла. Канадцы использовали огромное количество таких генераторов в Голландии. Дымовые генераторы этого типа применялись на 120-километровом фронте в течение трёх последовательных дней накануне и во время форсирования Рейна. Тихоокеанский флот сперва не намеревался использовать генераторы. Предполагалось,

что потребности в них не возникнет. Но после того, как японские воздушные атаки оказались очень успешными, было решено воспользоваться дымовыми генераторами и едва они были введены в действие, ни один корабль не был повреждён в результате воздушной атаки.

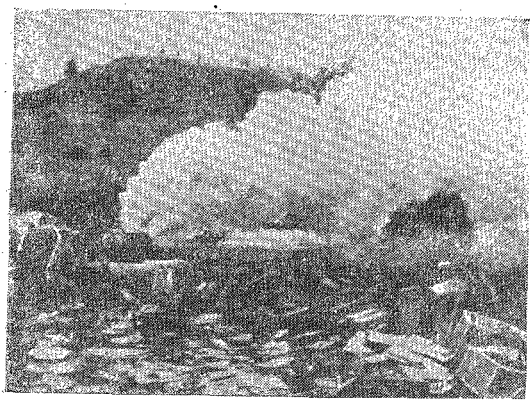

Рис. 7. «Механический» дымовой генератор М-1 на фронте после четырёхчасового артиллерийского обстрела немецкой артиллерией.

Рис. 8 показывает крупным планом дым, вырывающийся под высоким давлением из десяти сопел. Интересно отметить, что, по нашим вычислениям, генератор такого типа создаёт в каждую секунду 10^{17} или 100 квадрильонов дымовых частиц. Он образует их столь быстро и столь быстро выбрасывает их в воздух, что они не успевают коагулировать. В процессе достижения оптимального размера частицы не имеют шансов прийти в непосредственный контакт друг с другом. Это крайне существенно. Поскольку множество дымовых частиц содержится в ограниченном объёме и выходит через одно сопло, частицы могли бы расти путём слияния друг с другом, достигая много бо́льших размеров, чем это имеет место в действительности, и эффективность дыма была бы много меньшей.

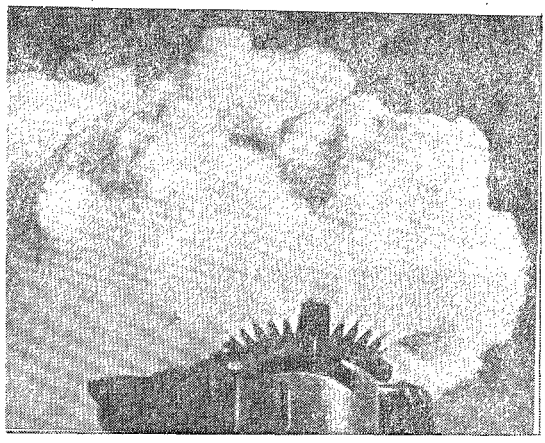

Рис. 8. Десятисопельный «механический» дымовой генератор М-1 снятый крупным планом.

Я хотел бы заметить, что имеется возможность тем же способом производить такое же количество частичек иодистого серебра, если, в связи с их влиянием на облака, возникнет в этом потребность. Имеется возможность

создавать с помощью одного генератора около 10^{17} частиц в секунду.

На рис. 9 показан другой пример дымовой защиты, использованный в боевых условиях. Это понтонный мост через Рейн. Он, очевидно, полностью скрыт от наблюдения с воздуха, в то время как люди продолжают на нём работу. Дым, образуемый генератором, не обладает ни сколько-нибудь заметным запахом, ни токсическим действием.

Как только армия взяла на себя ответственность за дальнейшее усовершенствование и производство генераторов, мы полностью устранились и вплоть до последнего времени ничего не знали об их судьбе.

Совершенно независимо от нашей работы над маскирующими дымами военный министр предложил нам заняться вопросами электростатики выпадения осадков. Это было в 1943 г. Предполагалось, что нападение Японии будет сопровождаться в широких масштабах воздушными атаками через Алеутские острова, через Аляску и с севера. Это вызвало огромное увеличение числа полётов через Алеуты.

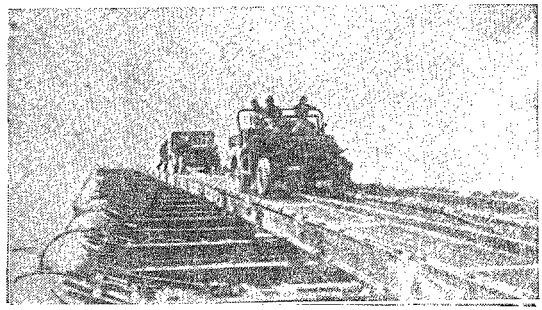

Рис. 9. Переправа через Рейн по понтонному мосту под прикрытием защитного дыма.

Трудности полёта в районе Алеут очень серьёзны. Одной из наибольших трудностей является обледенение самолётов. Однако ещё бо́льшим препятствием является полная потеря радиосвязи, когда самолёты попадают в снежные штормы. На Аляске самолёты, попавшие в шторм, заряжаются порой до 250 000 V и более. Это электрическое поле образует коронный разряд со всех частей самолёта, создающий такие электрические помехи, что использовать радиоаппаратуру для связи становится невозможным. Кроме того, серьёзные затруднения испытываются пилотами при отыскании их баз и посадке в туманную погоду.

У нас не было по этому вопросу никаких специальных соображений, не считая того, что в этом виновата погода. Мы полагали, что для исследований подобного рода не может быть лучшего места, чем гора Вашингтона в зимнее время. Гора Вашингтона имеет зимой удивительный климат. Средняя температура около — 20° С. Скорость ветра в среднем составляет около 110 *км* в час, днём и ночью, и бо́льшую часть времени с этой высокой скоростью над вершиной проносятся облака.

Нам казалось, что всё, что нам надлежит сделать с этим несущимся снегом — это взять различного рода поверхности, типа алюминия, взять различные покрытия для этих поверхностей, выставить их на несущийся снег и затем в благоустроенной лаборатории обсерватории на горе Вашингтона с хорошей аппаратурой и т. п. измерить величину электрических зарядов, которые образуются от ударов снега о выставленные поверхности.

Мы заблаговременно, до того как в середине октября закрылась дорога, отправили на обсерваторию большое количество оборудования. Затем несколько раз в течение зимы Шефер отправлялся туда проводить опыты во время штормов. Полученные результаты нас очень разочаровали. К нашему большому удивлению мы нашли, что какие бы поверхности мы ни выставляли на вершине горы Вашингтона в течение всей зимы, когда только там были облака, а они были там почти всё время, поверхности немедленно начинали покрываться льдом. Это говорило о присутствии капелек переохлаждённой воды. Мы слышали об инее, мы его видели, но мы не знали, что в местах, подобных вершине горы Вашингтона, он встречается постоянно. Очень немногие зимние дни обходились без инея. Это очень изумило нас.

Далее, по сообщениям пилотов, самолёты очень мало обледеневают или совсем не обледеневают во время снегопада. Известно, что когда воздух имеет температуру выше точки замерзания, лёд плавится, а когда температура воздуха ниже точки замерзания, то предполагается, что содержащаяся в нём жидкая вода замерзает. Это означает, что лёд более устойчив, чем вода. Едва вода приходит в контакт со льдом при температуре ниже точки замерзания, вода обращается в лёд. Следовательно, давление паров надо льдом ниже, чем над водой. Лёд имеет меньшую тенденцию к испарению, чем вода. Если вы имеете облако, содержащее водяные капельки, которые ещё не замёрзли, хотя температура ниже точки замерзания, давление паров над капельками будет выше, чем надо льдом. Это не необычно, и я ещё вернусь к этому.

Я выполнил много работ по испарению частичек согласно теории испарения, определяя, как много времени требуется более мелкой частице, чтобы испариться и сконденсироваться на более крупной. Когда вы обращаетесь к различию между льдом и водой, различие в давлении паров составляет 20% вместо нескольких тысячных процента в случае наших защитных дымов, о которых я упоминал ранее. Это в сотни или тысячи раз больше, чем в других случаях. Поэтому темп исчезновения водяных капелек в присутствии снега должен быть действительно очень большим.

Однако это предел. Возьмём некоторую массу воздуха и поднимем её достаточно быстро в облако — всякий раз, когда воздух поднимается в атмосфере, его давление падает. Это падение давления вызывает падение температуры вследствие расширения воздуха. Если

воздух сух, охлаждение составляет около 1° С на каждые 100 *м* подъёма. Если воздух содержит туман, следует учесть количество выпавшей влаги, ибо при конденсации влаги образуется некоторое количество тепла. Поэтому падение температуры с высотой будет меньше чем 1° на каждые 100 *м*. Когда облако растёт, водяные пары конденсируются всё время и имеют склонность к диффузии на снежные хлопья. Возникает вопрос — будет ли давление паров достаточно велико, чтобы возрасти на 10 или 20%, необходимых для образования водяных капель?

Если скорость подъёма делается достаточно большой, то водяные капли могут образовываться. Мы проделали некоторые вычисления и сравнили их с условиями, наблюдаемыми на горе Вашингтона. Если горизонтальная компонента скорости ветра составляет 110 *км* в час и если склоны горы образуют с горизонтом угол 30°, то вертикальная компонента скорости будет около 50 *км* в час, что является довольно высокой вертикальной скоростью. При вертикальной скорости 50 *км/час* охлаждение воздуха происходит столь быстро, что выпадающая влага не успевает сконденсироваться на снежных кристаллах и образует переохлаждённые водяные капли. Когда подобные облака приходят в соприкосновение с твёрдыми поверхностями, оседающие на поверхностях жидкие капельки немедленно замерзают, покрывая поверхность слоем льда. Именно так образуется обледенение самолётных крыльев.

Эта проблема нас настолько заинтересовала, что мы занялись её изучением. У нас оказалось много сотрудников из числа персонала обсерватории на горе Вашингтона. Они уже работали над вопросами обледенения и выпадения инея. На обсерваторской башне они выставляли цилиндры и проволоки различных диаметров и измеряли темп оседания на них льда, когда эти объекты находились в проходящих облаках. Цилиндры экспонировались в течение 15 минут, медленно вращаясь, для того чтобы лёд не отлагался только с одной стороны. Потом измерялась толщина и вес отложившегося льда, и цилиндры вновь выставлялись в облако и вращались ещё 10 или 15 минут, причём измерялась скорость ветра. Таким образом, определялось количество льда, накоплявшегося за определённый интервал времени. Они пытались интерпретировать свои данные и вычислять из них содержание переохлаждённой воды в воздухе и размеры жидких частиц. Было получено много ценных результатов относительно содержания переохлаждённой воды в воздухе, однако определения размеров частиц слишком сильно зависели от некоторых фотографических измерений, которые они делали с предметным стеклом, выставленным в проходящие облака. В действительности, прежде чем производилось фотографирование, происходило слияние капелек. Сотрудники обсерватории не отдавали себе отчёта в том, что сфотографированные капельки не являются первичными, но образовались путём слияния маленьких капелек в большие.

Я узнал, что немцы, а позднее англичане работали над теорией осаждения на вращающихся цилиндрах льда из водяных капелек. Проблема состояла в определении траекторий капелек.

Представьте себе цилиндр, находящийся в воздушном потоке. Воздух не пройдёт сквозь цилиндр, а обогнёт его. Он будет обтекать цилиндр так же, как ветер обтекает крыло самолёта. Поверхностное трение невелико. Скорость воздушной струи будет наибольшей близ поверхности цилиндра. Если скорость ветра невелика и велики размеры объекта, то частицы движутся вместе с воздухом, огибая цилиндр. Большие частицы тумана могут оказаться не в состоянии следовать этой искривлённой траектории. Частицы будут вести себя как артиллерийские снаряды. Если частицы достаточно велики, эффективность их собирания может достигнуть 100%. Это означает, что цилиндр будет собирать всю влагу в объёме воздуха, равном площади проекции цилиндра, умноженной на скорость воздушной струи.

Если теперь, напротив, частицы малы или скорость ветра низка, или цилиндр велик, многие частицы будут огибать цилиндр вместе с воздушной струёй, и эффективность собирания льда будет низка.

Для того чтобы определить эффективность, необходимо сделать некоторые вычисления, совершенно подобные тем, которые делают артиллеристы, вычисляя траекторию 16-дюймового снаряда при наличии ветра, имеющего тенденцию отнести снаряд в сторону. Это довольно трудоёмкие вычисления.

В оригинальных работах вычисления были сделаны применительно к не столь большим скоростям ветра, как те, которые господствуют на горе Вашингтона. Нам пришлось расширить эти вычисления. С этой целью мы использовали дифференциальный анализатор, созданный несколькими годами ранее для того, чтобы сделать подобные вычисления несравненно более лёгкими. Нам пришлось работать с этой машиной около трёх недель, вычисляя траектории частиц, минующих цилиндры и объекты различных очертаний. В результате мы могли вычислить процент воды, который должен оседать на цилиндре в специфических условиях. Мы намеревались использовать данные для горы Вашингтона и таким образом вычислить диаметры и число частиц, образующих облако. Теория оказалась в прекрасном согласии с опытом. Мы могли брать цилиндры различных размеров и получать значения, которые замечательно согласовались между собой. Мы почувствовали, что получили весьма удовлетворительный метод для изучения структуры облаков и причин, заставляющих расти образующие их частицы.

У основания облака на горе Вашингтона происходит непрерывное поднятие воздуха в облако. Это обусловлено формой горы. Внизу, в долине, воздух прозрачен, но так как воздух поднимается, он становится всё холоднее и холоднее и, наконец, когда достигает точки

росы, в нём образуются капельки воды. В каждом кубическом сантиметре возникают тысячи мельчайших частичек, образующих облако.

Чем определяются их размеры? «Хорошо, — я подумал, — разве это не то же самое, что в дымовом генераторе? Я вернусь назад, к той самой теории испарения-конденсации, которую я использовал для вычисления темпа роста дымовых частиц».

Я нашёл, что частицы должны уменьшаться в числе и возрастать в размерах в зависимости от скорости ветра и содержания жидкой воды. Мы получили значения для диаметров капелек, которые очень хорошо согласовались с действительно наблюдаемыми. В самом деле, два ряда значений дали коэффициент корреляции 0,94, что для метеорологических проблем предельно высоко.

Мы почувствовали тогда, что имеем фундаментальную теорию для некоторых из факторов, обусловливающих рост частиц в облаках до тех размеров, которые они имеют в действительности.

Однако условия горы Вашингтона весьма запутаны. Ветер дует над неровной поверхностью горы, создающей турбулентность и осложняющей структуру ветра. Было бы значительно лучше изучать рост частиц в облаке во время полётов на аэроплане, исключая то обстоятельство, что было бы необходимо придумать новый прибор для измерения вертикальной скорости ветра.

Шефер и я много размышляли над прибором, который можно было бы сконструировать и поставить на самолёт, чтобы получить все необходимые данные в единичном полёте сквозь облака. Мы хотели бы измерить, как много воды содержится в облаке? Как велики частицы, образующие его, и как они распределены по размерам? Каковы вертикальные скорости ветра? Сколько времени потребовалось, чтобы воздух достиг основания облака? Как быстро он поднялся внутрь облака?

Таковы были сведения, которые мы хотели получить. Это означало акселерометр или что-нибудь подобное для измерения воздушных возмущений. Получение таких данных — это огромная работа.

Война подходила к концу, и у нас кончались армейские контракты. Я не видел, почему Дженерал Электрик Компани должна интересоваться метеорологическими работами. Однако, казалось, что, продолжая их, мы сумеем понять много существенного в отношении облаков. Мы поставили вопрос перед военным ведомством, полагая, что кто-нибудь, может быть, предоставит самолёт для опытов подобного рода. Дело продвигалось не очень быстро. Мы продолжали исследование в значительной мере самостоятельно, используя приборы на горе Вашингтона, но мы не использовали самолётов.

Нас чрезвычайно поражала относительная редкость в течение зимы на горе Вашингтона и в других местах облаков, которые содержали бы кристаллы льда или снега. Обычно по виду облаков нельзя судить, выше или ниже точки замерзания их температура. Облака не отличаются по внешности. Если же облака содержат снег, они

выглядят иначе. Мы выяснили, что существуют заметные различия в виде облаков. Диск солнца, если его рассматривать через снежное облако, кажется размытым (fuzzy). Если облака содержат водяные капельки, диск солнца никогда не размывается. Мы создавали дымы с частицами самых различных размеров, но если смотреть сквозь дым, то края солнца кажутся совершенно резкими.

Вы могли, наблюдая луну, заметить, что временами видимый диск столь велик, что трудно определить его размеры. Это явление обусловлено перистыми облаками. Существует и много других явлений, характеризующих снежные облака.

Больше всего наше внимание привлекло то обстоятельство, что если в облаке имеются снежные кристаллы, то они должны расти и выпадать. В зимнее время вы увидите слоистые облака, из которых не выпадает снега, даже если температура в облаке ниже точки замерзания. Это просто означает именно то, что в облаке отсутствуют кристаллы в сколько-нибудь заметном количестве. Такие облака состоят из водяных капелек. Они могут быть переохлаждены до чрезвычайно низкой температуры.

Мы полагали, что эту проблему следует изучить. Почему получается так, что в некоторых случаях снег образуется очень легко, не испытывая, повидимому, недостатка в ледяных ядрах, на которых могли бы расти кристалики, а в других случаях этого не происходит? В атмосфере должно происходить что-то, заставляющее капельки превращаться в лёд только в определённое время и при определённых условиях. Шефер и я пришли к выводу, что следует произвести тщательные лабораторные опыты и постараться воспроизвести эти условия. Я уехал тогда на три или четыре месяца в Калифорнию и когда вернулся, то нашёл, что Шефер проделал замечательные опыты. Он взял домашний холодильник, употребляемый для хранения пищи, объёмом около 0,4 $м^3$, отделал его изнутри чёрным бархатом и направил внутрь него луч света с тем, чтобы можно было видеть, что происходит в камере. Затем он подышал внутрь камеры, и хотя температура была около —23° С влага сконденсировалась в виде частичек тумана, вполне подобных обычным облачным частичкам. Никаких ледяных кристаликов не образовалось. С целью вызвать кристаллизацию он распылял внутри ящика различные вещества, но практически никогда не добивался кристаллизации. Получалось достаточное количество кристаликов, чтобы убедиться, что если они получаются, то их легко можно увидеть. Однако число их было совершенно ничтожным. Наконец, однажды температура в камере была недостаточно низкой. Желая понизить её, он принёс большой кусок сухого льда и положил его в камеру. Тотчас же воздух заполнился л дяными кристаликами, миллионами кристаликов.

Тогда он вынул сухой лёд и, несмотря на это, кристалики сохранились. Затем он нашёл, что даже мельчайший кусочек сухого льда вызывает заполнение всего объёма камеры кристаликами. По-

том он взял иголку, охладил её жидким воздухом и провёл ею поперёк камеры. В результате опять образовались сотни миллионов ледяных кристаликов — путём только кратковременного контакта с иголкой. Эффект быстро распространился по всей камере. Это удивительный опыт. Его следует посмотреть. Проделать его очень легко и он должен проделываться в каждой высшей школе. Одна студентка сделала камеру из бака для кипячения белья, охладив его рассолом. Наблюдаемый эффект поразителен и простым способом воспроизводит все естественные условия, имеющие место в действительных облаках на небе.

Итак, это открытие изменило всю ситуацию. Первое, что было обнаружено, это то, что сухой лёд не оказывает никакого непосредственного влияния на переохлаждённое облако; существенна только его температура. Иголка, вместо того чтобы быть охлаждённой жидким воздухом, может охлаждаться сухим льдом. Вместо сухого льда может быть использовано любое тело, охлаждённое до температуры, меньшей — 40° С.

Наконец, дальнейшее исследование показало, что имеется критическая температура, около — 39° (температура замерзания ртути), при которой происходит спонтанное образование естественных ядер. Это можно очень убедительно показать, если закрыть камеру стеклом, охладить её до —40° С и осуществить непрерывную подачу в неё влаги путём испарения льда. Ледяные кристалики непрерывно выделяются и оседают на дно.

Если, напротив, охладить камеру до —20° С и впустить в неё воздух из лаборатории, порой можно обнаружить незначительное количество кристаликов, но если ящик закрыть, то они вырастут и выпадут, дальнейшее же образование кристаликов прекратится, пока вы не впустите внутрь камеры некоторого количества нового воздуха.

Немного позднее Воннегут в нашей лаборатории проанализировал опубликованные данные о кристаллических формах ряда других веществ и нашёл, что иодистое серебро имеет почти в точности ту же самую кристаллическую форму, что и лёд, и что оно может служить в качестве ядер для роста ледяных кристаллов.

Вы можете проделать этот опыт. Возмите серебряную монету и, держа её в руках, внесите в высокочастотную искру от трансформатора Тесла. В момент, когда монета находится в искре, дуньте на неё сверху вниз в открытую сверху и заполненную холодным воздухом камеру. Затем, многовение спустя, откройте баночку иода и вдуньте в ящик немного его паров. Вскоре вы обнаружите, что воздух в камере заполняется ледяными кристаликами, отстоящими друг от друга менее чем на миллиметр. Это означает, что от частичек иодистого серебра, которые образовались путём испарения серебряной монеты в тот момент, когда вы держали её в руках, в 100 *л* воздуха возникает около 100 миллионов снежных кристаликов.

Электронно-микроскопическое исследование этих частиц показывает, что из одного грамма иодистого серебра может быть получено около 10^{17} ядер. Следовательно, нескольких килограммов иодистого серебра было бы достаточно, чтобы снабдить ядрами воздух над всей территорией США одновременно, причем в каждом кубическом сантиметре будет содержаться одна частичка, что значительно больше, чем число ядер, обычно содержащихся в воздухе в естественных условиях.

Тот дымовой генератор, о котором я говорил уже ранее, может создавать 10^{17} дымовых частиц в секунду. Если дым иодистого серебра получать этим путём, то материал стоил бы пять долларов в час. Более трудной является проблема обеспечения должного распространения частиц. Если частички в естественных условиях сохраняют активность, которую они имеют в лабораторных опытах, то широкое распространение их в атмосфере может оказать существенное влияние на климат.

Таблица I показывает зависимость между температурой и давлением паров. Во второй и третьей колонках приведены значения $e_в$ и

Таблица I

Давление паров над поверхностью воды и льда и критические диаметры ледяных ядер в функции температуры

Температура в градусах С	$e_в$ в миллибарах	$e_с$ в миллибарах	$e_в - e_с$ в миллибарах	$\frac{e_в - e_с}{e_в}$	Критический диаметр в 10^{-6} *см*
0	6,11	6,11	0	0	∞
—1	5,27	5,17	0,10	0,019	7,8
—5	4,19	3,99	0,20	0,048	3,10
—10	2,86	2,60	0,26	0,091	1,68
—15	1,89	1,64	0,25	0,133	1,18
—20	1,25	1,03	0,22	0,174	0,93
—30	0,51	0,38	0,13	0,256	0,67
—40	0,19	0,13	0,064	0,332	0,56

$e_с$ — равновесных давлений паров над поверхностью воды и льда или снега соответственно. Следующая колонка содержит разность между давлением паров воды и льда. Она достигает максимума в 0,28 миллибара при —12° С. В предпоследней колонке выписаны те же разности давлений паров воды и льда, выраженные в долях давления паров воды. Так, при —40° С давление паров воды на 33% выше, чем для льда.

Последняя колонка показывает, как велики должны быть ледяные кристалики для того, чтобы они могли расти. Очень маленькие ледяные частички имеют более высокое давление паров, чем крупные ледяные кристаллы, и если их диаметр меньше указанного в таблице

критического диаметра, то давление паров над их поверхностью больше, чем над поверхностью воды. Поэтому кристалики льда, размеры которых меньше критических, не в состоянии расти даже в облаке переохлаждённых водяных капелек. Ясно, однако, что в переохлаждённом облаке при температуре ниже —5° С все ледяные частички (ядра), диаметр которых больше чем $3 \cdot 10^{-6}$ *см*, должны расти.

Таблица II

Падение шариков CO_2 в воздухе при —20°С

Диаметр шарика в *см*	Скорость падения в *см/сек*	Время падения до испарения всего шарика в сек.	Расстояние, проходимое шариком до его полного испарения в *м*
1	2120	350	4300
0,4	1420	127	1130
0,2	950	59	330
0,10	564	26	82
0,04	233	8	10
0,02	105	3	1,6
0,01	41	1	0,3

В таблице II приведены данные о падении шариков из сухого льда в воздухе и расстояния, которые проходят шарики различных диаметров при падении, прежде чем успевают полностью испариться.

Так, падающая частица диаметром 0,4 *см*, прежде чем испариться, пройдёт расстояние 1000 *м*. Этот расчёт даёт некоторое представление о размерах частиц, которые необходимы для того, чтобы использовать их, бросая сквозь облака.

Используя принципы, развитые в течение наших исследований роста дымовых частиц и образования инея, я смог вычислить количество воды, которое конденсируется из паров путём контакта с падающим шариком сухого льда. Результаты приведены во второй колонке таблицы III. Четвёртая колонка даёт объём воздуха, охлаждаемого за 1 секунду до температуры, меньшей —40° С; в этом объёме спонтанно образуются ледяные кристалики. Концентрация образующихся ядер вначале столь велика, что даже в течение короткого времени контакта с падающим шариком частицы вырастают вследствие коагуляции, создавая концентрации, указанные в третьей колонке.

Из этих данных можно вычислить диаметр (пятая колонка) и полное число (шестая колонка) образующихся ядер. Опыты показали, что расчёт очень точен. Большинство мельчайших частиц сухого льда, бросаемых в шеферовскую холодильную камеру, создавало сотни миллионов ледяных кристаликов.

13 ноября 1946 г. Шефер сбросил с самолёта в переохлаждённое слоисто-кучевое (StCu) облако около 3 *кг* гранулированного сухого

Таблица III

Количество и размеры ледяных ядер, создаваемых в облаке падением шарика твёрдой углекислоты при температуре облака—20° С

Диаметр шарика в *см*	Полный вес воды, конденсируемой в объёме, охлаждаемом падающей частицей, в *мг*	Концентрация ядер в 1 *см*³	Объём воздуха, охлаждаемого падающей частицей в 1 секунду, в *см*³	Диаметр образующихся ядер в 10^{-6} *см*	Полное количество ядер, образующихся при падении частицы
1	960	$3 \cdot 10^{13}$	70	2,9	$1,7 \cdot 10^{17}$
0,4	61	$5 \cdot 10^{13}$	18	2,2	$2,6 \cdot 10^{16}$
0,2	7	$7 \cdot 10^{13}$	6	1,9	$6 \cdot 10^{15}$
0,1	1,0	$8 \cdot 10^{13}$	2,2	1,6	$1 \cdot 10^{15}$
0,04	0,06	$8 \cdot 10^{13}$	0,5	1,4	$1,2 \cdot 10^{14}$
0,02	0,007	$7 \cdot 10^{13}$	0,2	1,4	$5 \cdot 10^{13}$
0,01	0,001	$56 \cdot 10^{13}$	0,1	0,6	$2 \cdot 10^{13}$

льда, из расчёта примерно 400 *г* на 1 *км*. Затем он пролетел назад, наблюдая результаты, оказавшиеся крайне поразительными. Всё переохлаждённое облако превратилось в мельчайшие ледяные кристалики. С этого времени мы заключили контракт с корпусом связи. Работа (Cirrus Project) проводится корпусом связи и флотом в сотрудничестве с военно-воздушными силами. Операции выполняются экспериментальной группой, состоящей целиком из военнослужащих. Рис. 10 показывает результаты испытаний, проделанных 7 апреля 1947 г., во время которых слоистые облака были засеяны сухим льдом. Вершина облака находилась примерно на высоте 2000 *м*. Слой облаков имел толщину около 1200 *м*. Фотография получена с высоты примерно 1400 *м* над вершиной облака.

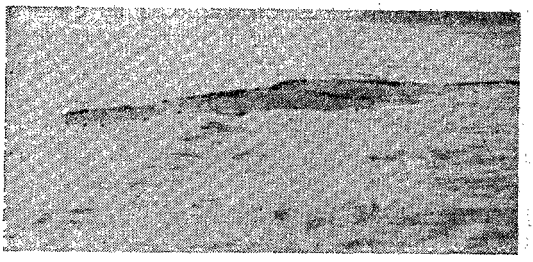

Рис. 10. Часть L-образного пробного засева слоистых облаков, произведённого в 4 часа 39 минут после полудня. Самолёт находился на высоте 3400 *м* в 5 часов 04 минуты после полудня (7 апреля 1947 г.).

Длинная тёмная полоса, видимая на фотографии, — это только часть засеянной области, имевшей около 22 *км* в длину и 5,5 *км* в ширину. Засеянная область состоит из снежных кристаллов, тогда как окружающее облако образовано переохлаждёнными капельками.

Засеянная область кажется тёмной на белом фоне незасеянных облаков. Ледяные кристаллы и капельки воды различным образом

рассеивают лучи света. С некоторых направлений облака ледяных кристаллов выглядят темнее, чем переохлаждённые облака, но с других направлений относительно солнца они светлее переохлаждённых облаков.

Рис. 11 показывает ту же область, снятую несколько раньше с другого направления. Линия засева имела форму буквы *L*, каждая сторона которой простиралась примерно на 11 *км*, в длину. На фотографии она выглядит, как белая река.

Рис 11. Тот же самый L-образный засев, снятый в 4 часа 54 минуты после полудня с высоты 2800 *м*.

Интересная фотография приведена на рис. 12. В засеянной области видно прямое зеркальное отражение солнца. Это характерно для ледяных кристаллов, имеющих форму гексагональных пластинок. Они имеют тенденцию падать в горизонтальном положении, и если развернуть самолёт так, что солнце окажется в соответствующем направлении, то высокая интенсивность отражения будет определяться тем фактом, что вы смотрите сверху на эти маленькие плоские кристалики, плавающие горизонтально. Наличие такой «солнечной колонны» под солнцем является решающим доказательством образования ледяных кристаллов. Она никогда не появляется в переохлаждённых облаках.

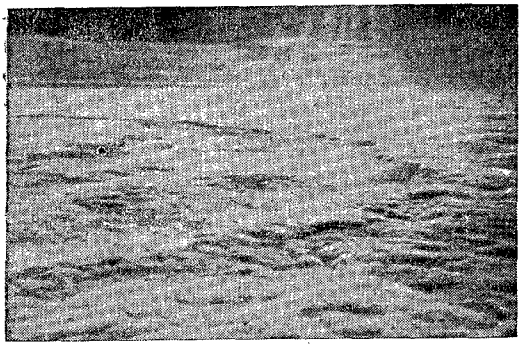

Рис. 12. Фотография L-образного засева, снятая в 5 часов 16 минут после полудня с высоты 3600 *м* в направлении на солнце.

Нам не встретилось ни одного случая, когда обычное облако с температурой ниже точки замерзания нельзя было бы превратить в облако ледяных кристаллов путём засева его сухим льдом.

Рис. 13 показывает размеры засеянной области в километрах. Эта область охватывает площадь, близкую по размерам к озеру

Джорджа в Нью-Йорке. Временами поражённые области достигали размеров острова Манхеттен. Мы сознательно засевали малую площадь, чтобы она была не слишком велика для фотографирования.

Этой зимой мы надеемся произвести опыты с пятью самолётами. Когда я сказал «мы», я подразумевал экспериментальную группу, контролирующую эти самолёты.

Мы не проводили широких исследований на этом типе слоистых облаков. Из результатов, полученных нами, совершенно очевидно, что с помощью одного самолёта может быть засеяно и превращено в ледяные кристалики примерно 1700 *км*² слоистых облаков за 1 час полёта. До настоящего времени мы не предприняли ни одного опыта столь большого масштаба, ибо было бы трудно проследить изменения, происходящие в области площадью 1700 *км*². Этой зимой, вероятно на побережье, может быть на Аляске, мы надеемся провести опыты в очень больших масштабах, чтобы выяснить, окажется ли возможным полностью устранить условия обледенения самолётов на большой площади путём превращения всех переохлаждённых водяных капелек в этой области в ледяные кристалики, не представляющие уже никакой опасности с точки зрения обледенения.

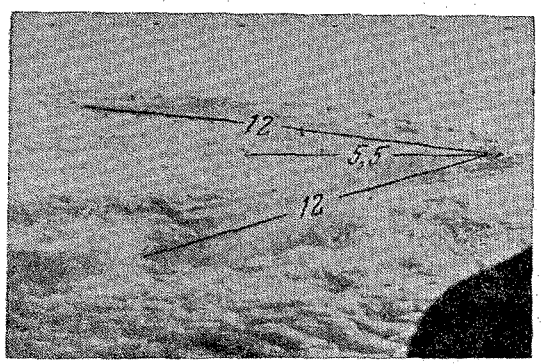

Рис. 13. L-образный засев, снятый в 5 часов 24 минуты после полудня с высоты 4500 *м*. Указаны действительные размеры засеянной площади в *км*, вычисленные из углов, измеренных на фотографии.

Во время некоторых из полётов, произведённых минувшей зимой, можно было наблюдать с земли, что через 10—15 минут после засева появлялось большое пространство, свободное от облаков. Я видел однажды в Скенектеди целых 350 *км*² ясного неба, тогда как ни перед засевом, ни после него в облаках не было никаких просветов, исключая эту единственную область, около 40 *км* в длину и 9 *км* в ширину, двигавшуюся вместе со всем образованием к горам; на границах просвета можно было наблюдать падающий снег.

Результат этот очень интересен, хотя и трудно поддаётся фотографированию.

Производился также засев кучевых облаков (Cu). Мы разрабатывали технику, тренировали персонал и занимались, по существу, организационными вопросами для обеспечения эффективной работы

этой зимой. Удивительно, что в течение июля и августа, несмотря на то, что вообще было крайне мало дождей, было поразительное число дней, когда можно было наблюдать несколько очень больших кучевых облаков, имевших нижнюю границу на высоте около 1500 *м* или выше и не дававших никакого дождя. Облака эти выглядели, как грозовые, но они не развивались до этой стадии. Часто они простирались до высоты 7500—9000 *м* и даже более. Такой высоты они достигали не всегда, но довольно часто. Основное, что наблюдается при засеве таких облаков — это то, что всё происходит очень быстро.

Вершина облака может быть охлаждена ниже точки замерзания всего только на протяжении около 2,5 *км*. Уровень замерзания может располагаться около 5,5 *км* и вершина облака — около 8 *км*. Когда вершина такого облака засевается сухим льдом, то наблюдаемый результат часто оказывается по меньшей мере необычным.

Однажды мне пришлось ехать на автомобиле под облаком, которое в это время засевалось. За всю мою жизнь я никогда не видел такого тяжёлого дождя. Я попал под ливень примерно на 15 минут. Ветер был столь силён, что казалось он хочет выкорчевать деревья. И, действительно, несколько деревьев было снесено. К счастью, он не нанёс ущерба. Мы отъехали к краю дороги, ибо не знали, что ещё может случиться. Затем начался небольшой град — мелкие кусочки диаметром около сантиметра, затем дождь. Обычно первым приходит град, но здесь первым был дождь, продолжавшийся в течение пяти или десяти минут и лишь после этого немного града.

Я понемногу тронулся в путь и проехал менее километра. Дождь прекратился. Я вышел из машины и огляделся. Дорога была суха. Здесь вообще не было дождя. Мы полагали, что гроза должна пойти в нашу сторону, на восток. Но эта гроза не пошла на восток. Она просто окончилась. Полностью. К этому времени, через пять минут после прекращения дождя, дождя не было видно нигде. Итак, это совсем необычный тип грозы.

Другие люди проделывали то же в другой части страны, и совпадение результатов было совсем поразительным. Сообщения отмечали, что наибольший эффект получался через десять или пятнадцать минут. Дождь обычно достигал наибольшей силы на пятнадцатой — двадцатой минуте и кончался немногим позже получаса. В нескольких случаях они вызывали длительный дождь, продолжавшийся несколько часов и дававший до 2 *см* и больше осадка. Осадок в 2 *см*, видимо, очень обычен для дождя над ограниченной областью. Это близко примерно к тому, что можно ожидать из содержания воды в таком облаке.

Иными словами, повидимому, за короткое время оседала большая часть влаги, содержавшейся в облаке. Для меня было крайне интересно узнать, каким образом такие вещи могут происходить столь быстро, каким образом так быстро мог пойти дождь. Влияние сухого

льда состоит в охлаждении небольшого объёма воздуха до —40° С, вследствие чего образуется огромное количество ледяных кристаликов, которые затем растут, пока не используют всю содержащуюся в облаке влагу. Чем больше кристаллов заключается в данном объёме облака, тем меньше размеры образующихся на них снежинок. Близ границ засеянной области ледяных кристаликов образуется несколько меньше, они вырастают до бо́льших размеров и быстрей выпадают. Напротив, введение в облако избыточного количества ледяных кристаликов приводит к тому, что выпадает мелкий дождь — это заключительный дождь. Избыточные кристалики в основном будут проскакивать через облако без того, чтобы что-то образовывалось вновь.

В действительности, вопрос заключается в том, что снежная буря продолжается длительное время, хотя вначале в воздухе присутствует лишь незначительное количество ледяных ядер. Должен существовать некоторый процесс, при котором образуются новые ядра или ледяные кристаллы, обусловливающие развитие цепного процесса. Цепной процесс — это когда вы начинаете с одной снежинки, и с помощью некоторого механизма их становится две. Тогда эти две превратятся в четыре, восемь и т. д., процесс распространяется очень быстро, в точности тем же путём, как в стоге сена, если вы зажжёте его спичкой. Он загорится. Нет никакой разницы — зажигается ли он в трёх местах или в одном месте. Пламя распространится по всему стогу. Тепла, создаваемого при сгорании одной частички сена, достаточно, чтобы нагреть следующую частичку.

То же и со снежинками. Пока я не знаю, но подозреваю, что цепным процессом, идущим в естественном шторме, является разламывание кристаллов. Мы пытались исследовать это явление и мы полагаем, что электрические явления имеют место позднее, чем стимулирующий процесс. Мы можем с помощью электричества стимулировать рост ледяных кристаллов после того, как они созданы, но мы не можем инициировать их. Мы можем пропустить через нашу камеру мощный электрический разряд, но никогда не образуется ни одного кристалла из переохлаждённой воды. Если мы введём в холодильник с переохлаждённым облаком сухой лёд и приложим сильное электрическое поле, то ледяные кристаллы вырастут в длинные иглы или волокна, которые при достаточно сильном поле разламываются на пары сильно заряженных обломков. Поэтому мы думаем, что электрические эффекты играют роль, но только на более поздней стадии.

Итак, это цепной процесс, который мы в состоянии осуществить в зимние метели с помощью сухого льда, если мы засеем имеющую достаточный запас влаги метель, которая растёт естественным образом. Мы старались избегать этого в населённых районах. Мы не хотели вызвать шторма, который мог бы причинить значительные убытки. Крайне важно выяснить, возможны ли эти вещи и тщательно изучить, как получать наилучшие результаты.

Недавно имел место крайне интересный полёт Л. Б. Леопольда и М. Х. Хельмстеда над Гаваями, во время которого сухим льдом засевались облака при температуре $+10°$ С, в результате чего возник дождь. Облака начали расти вверх с высоты 2,5 *км* и, достигнув высоты 4,5 *км*, поднялись над уровнем замерзания, после чего они были повторно засеяны большим количеством сухого льда. Облака выросли до высоты 8000 *м*, стали дождить, разрослись, пересекли море, прошли от острова к острову и дождили всю ночь.

Результат этого опыта заставил меня сильно задуматься, ибо я интересовался образованием дождя ещё с 1944 г., когда начал развивать математическую теорию роста частиц в облаках.

У кучевых облаков, засевавшихся этим летом, над уровнем замерзания находилась только вершина. Снег, который образовывался в этой вершине, падал вниз, таял и превращался в капельки воды, которые затем собирали всю воду, содержавшуюся в облаке, и разрушали облако всего за 15 или 20 минут. Стало быть, нечто происходит во всём облаке, а не только в его вершине. У меня возникла мысль, что это должен быть цепной процесс.

Я стал размышлять над этим вопросом. Мною были проделаны все математические расчёты, но я никогда раньше не думал об этом, как о цепном процессе. Я применил идею цепного процесса к рассказанному случаю в Гонолулу. Он показал мне, что в действительности эффект очень прост и оставалось только удивляться, почему никто до сих пор не обратил на это внимания. Если в облаке имеется большая капля воды, только одна, и если эта капля падает, то при своём падении она будет расти. Это произойдёт только в том случае, если её размеры больше некоторой величины. Для того чтобы определить, каковы должны быть эти размеры, необходимо использовать те же математические методы, какие мы применяли при вычислении процесса образования инея на цилиндрах.

Соответствующие вычисления производились мною в течение последних трёх месяцев, и в результате было выяснено, как именно велика должна быть капля для того, чтобы она росла при падении.

Если капля растёт, она растёт экспоненционально. Чем капля больше, тем быстрее она растёт и тем быстрее падает. По мере увеличения площади её поперечного сечения она захватывает всё больше капелек, встречающихся на пути и заключающихся в объёме примерно конической формы, сечение которого увеличивается к основанию облака. Капля растёт всё быстрее и быстрее, пока не вырастает настолько, что распадается на части, образуя капельки меньших размеров.

Если отсутствуют восходящие воздушные потоки, все эти капельки будут продолжать падение, пока не достигнут нижней границы облака и не выпадут из него. Цепного процесса не возникает.

Предположим, однако, что имеется восходящий поток воздуха, так что маленькие капельки, возникшие при распаде выросшей до-

предела падающей капли, уносятся вверх. Через некоторое время они вернутся на уровень, где началось падение исходной капли, и в свою очередь могут повторить её историю и вырасти до предела, когда они распадутся на части. Тогда одна капля создаёт две или десять и каждая из них в свою очередь создаёт две или десять. Поскольку фактор размножения больше 1, — это цепной процесс, и всё облако превратится в тяжёлый дождь.

Теперь мне ясно, что всё это имело место при опытах в Гавайе. Это имело место каждый раз, когда мы засевали кучевые облака.

Я разработал математическую теорию, которая вскоре будет опубликована *). Она проста. Она гласит, что условия, которые должны выполняться, чтобы привести к цепному процессу, суть вертикальная скорость ветра 9 *км/час* и содержание влаги, обеспечивающее по крайней мере 2,5 *мм* осадков. Частицы, образующие облака, должны быть довольно большими — около 20 микрон в диаметре. Очень маленькие частицы не создадут дождя Когда эти специфические условия имеют место, то одна единственная капля воды способна разрушить всё кучевое облако и принести на землю большую часть содержащейся в нём влаги.

Засев водой окажется столь же эффективен, как и засев сухим льдом, и, кроме того, может применяться значительно чаще, например в тропиках, где низкие температуры не встречаются.

Литература полна примеров, когда люди наблюдали явления этого рода, но не понимали их. В течение всей войны военные наблюдали тяжёлые тропические ливни, но не могли понять, каким образом такой тяжёлый дождь может образовываться без снежных хлопьев в вершине облака, служащих основой для роста дождевых капель.

Разумеется, мы намереваемся испытать этот тип засева в больших масштабах на тропических островах с целью выяснить, способен ли водяной засев занять место наряду с засевом сухим льдом.

Мы сделали ещё две вещи, представляющие интерес. Одна — это засев облаков в Новой Англии с целью попытаться вызвать дождь, достаточный для тушения лесных пожаров. Результаты оказались неубедительными, ибо рассеянные дожди, возникшие в тот день, начались примерно за час или два до засева.

Другая интересная вещь — это наша деятельность в отношении ураганов. Вы помните, что 23 сентября над Миами прошёл ураган, нанесший городу повреждения. Газеты были полны сообщений, что кое-кто летал засевать его. Летавших называли «разрушителями ураганов». Я не знаю, откуда взялось это название, ибо, поскольку мне известно, никто не собирался разрушать ураган. Полёт был совершён для получения сведений. Однако мы не были к этому готовы. Требовалось много работы и полётов. Наша группа не была подго-

*) Эта теория цепного процесса была доложена на собрании Американского метеорологического общества 28 января 1948 г. и будет опубликована полностью в журнале этого общества.

товлена к большим операциям, таким как изучение возможного влияния засева урагана сухим льдом. На самолётах отсутствовало необходимое оборудование и люди не были достаточно тренированы.

Следующий ураган появился, или мы впервые узнали о нём, 10 октября. Самолёты были готовы 11 октября. Они отправились в Мобиль и затем в Тампа произвести разведку. На следующий день, в воскресенье, ураган двигался с необычайной быстротой. Он пересёк Кубу, неожиданно направился во Флориду и вскоре был по другую сторону Миами, над морем. Самолёты могли бы отправиться в воскресенье в полдень и попытаться что-нибудь сделать, но было решено от этого воздержаться и выждать, пока условия станут наиболее благоприятными.

13 октября действительно был произведён экспериментальный засев урагана. Опыт был проведён под контролем экспериментальной группы Cirrus Project. Я не принимал в них участия, но Шефер и представитель General Electric находились в качестве наблюдателей на двух самолётах. Привожу рапорт, составленный главой экспериментальной группы Д. Ф. Рексом.

13 октября 1947 г. экспериментальной группой Cirrus Project был произведён засев в небольшом масштабе тропического урагана, локализованного в 350 милях на восток-северо-восток от Джексонвиля, Флорида Группа, состоявшая из трёх самолётов, базировалась в Тампа, Флорида. Старт состоялся утром в понедельник, в 8 часов 30 минут по американскому времени. Самолёты направились в область шторма и достигли внешнего вала ока в 10 часов 45 минут.

Ураган состоял из ока примерно 55 *км* в диаметре, окружённого мощным валом облаков, простиравшихся в высоту примерно от 250 *м* до покрова перистых облаков, располагавшегося на высоте 6 *км*. В радиальном направлении толщина вала составляла около 50—90 *км*. От внешнего вала тянулось несколько ярусов (4 или 5) стратифицированных облачных гряд. Вершины облаков верхнего яруса достигали 5,5 *км*. Эти гряды заполняли большую область (300—700 *км*^{2}) и имели вид плотного тонкого подстила (300—600 *м* толщиной), разделённого большими просветами, через которые часто видна была поверхность моря. Черезвычайно активная шквальная линия,выглядевшая, как почти непрерывная линия дождевых кучевых облаков (CuNi) с перистыми вершинами, поднимавшимися примерно до 18 *км*, имела форму спирали, протягивающейся от центра на восток и юг. От центрального основания, расположенного близ внешнего вала на высоте около 6 *км*, тянулись хорошо развитые перистые купола, поднимавшиеся у краёв до 10 *км*.

Самолёты приблизились к центру шторма с юго-запада. Этот курс привёл группу в правый задний квадрант шторма. После короткого разведывательного полёта вокруг внешнего вала было принято решение засеять дорожку над наиболее высокой облачной грядой. Самолёты построились цугом с засевающим самолётом, летевшим на уровне облаков в качестве ведущего. фоторазведывательный самолёт следовал за засевающим на расстоянии 2—4 *км* и примерно на 1 *км* выше него. Контрольный самолёт двигался на высоте 1,5 *км* над облаками, отставая от ведущего на 30—40 *км*. Засев был начат в 11 часов 38 минут по американскому времени с 29°,8 северной широты и 74°,9 западной долготы и производился с высоты 5800 *м*. Температура воздуха была около — 5° С. Непрерывный засев продолжался по прямому курсу до 30°,2 северной широты и 73°,9

западной долготы и затем до 30°,8 северной широты и 73°,1 западной долготы, где был закончен в 12 часов 08 минут по американскому времени. В течение этого тридцатиминутного интервала вдоль 200-километрового пути было рассеяно 36 *кг* твердой углекислоты. Кроме того, две порции, по 23 *кг* каждая, были высеяны в вершину большого кучевого облака около 30°,7 северной широты и 73°,4 западной долготы. По окончании засева все самолеты взяли обратный курс вдоль засеянного пути, производя визуальные и фотографические наблюдения. Ввиду отсутствия групповых навигационных средств (радиокомпаса и сигнальных ракет) не было предпринято никаких попыток проникнуть через вал шторма в его око или засеять шторм внутри или близ упомянутой выше шквальной линии. Попытка такого рода, хотя и желательная, имела бы, вероятно, результатом разделение самолетов с последующей неудачей в выполнении первоочередной задачи

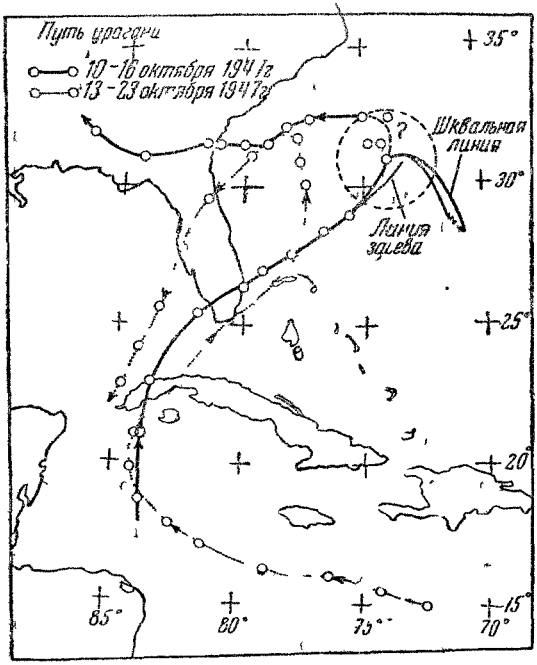

Рис. 14. Путь ураганов 10—16 октября 1947 г. и 13—23 октября 1906 г.

Визуальные наблюдения засеянной области показали резко выраженные изменения засеянных облачных слоёв. Никаких регулярных борозд не наблюдалось Скорее наблюдавшийся ранее облачный подстил выглядел, как область широко разметанных снежных облаков. Область нарушении покрывала площадь примерно 1000 *км*². В течение времени наблюдений никакой конвективной деятельности за процессом засевания, повидимому, не последовало.

Группа вернулась в Тампа и приземлилась в 16 часов 13 октября 1947 г Никаких дальнейших полётов с целью продолжения наблюдений не предпринималось.

Итак, данный ураган возник около островов западнее Ямайки, двинулся на север, прошёл через Флориду за Миами, затем вышел в море и в момент засева находился в 650 *км* от берега. Круг на рис. 14 указывает приблизительно область, занятую облаками. Путь засева — это короткая линия, проходящая почти прямо чуть ниже центра окружности. Шквальная линия показана стрелкой справа. Дальнейший путь урагана в течение суток, или около того, оставался неизвестным. Специалисты сперва предполагали, что ураган имел два центра, но затем пришли к выводу, что двух центров не было. Шторм повернул и направился на запад.

Необычной является крайняя мягкость шторма, отмеченная наблюдениями с самолётов. Во многих районах вообще не было шторма и погода казалась сравнительно сносной. Не было кучевых облаков, не было дождя, скорость ветра на высоте полёта составляла около 55 *км* в час и эффект засева был такой же, какого можно было ожидать в подобных условиях в Скенектеди.

Чувствовалось, однако, что если бы самолёты могли оказаться на другой стороне шквальной линии, о которой я уже упоминал, то могли бы произойти некоторые действительно важные вещи. Что произошло на самом деле — никто не знает. Шквальная линия не является формальным признаком урагана. Когда она возникла, когда она исчезла, что с ней случилось — никто не знает. Бюро погоды не располагает никакими данными. На фотографиях, сделанных с самолёта, шквальная линия хорошо видна, но кроме этого нет никаких метеорологических данных, которые свидетельствовали бы о её существовании и позволяли бы судить, чем она вызвана и что она означает.

Основное, что мы вынесли из этого полёта—это то, что об ураганах необходимо знать несравненно больше, чем мы знаем в настоящее время.

Рассмотрим, например, ураган 23 сентября. Он был далеко в море, восточнее Флориды, и двигался на север или северо-восток. Согласно прогнозу погоды ожидалось продолжение его движения на северо-восток параллельно берегу. Вместо этого он неожиданно круто повернул, пошёл на запад и нанёс ущерб Миами.

В 1906 г. между 13 и 23 октября был ураган, который прошёл по пути, указанному на рис. 14 пунктирной линией, очень близко к пути урагана в октябре 1947 г. Он также повернул почти назад и двинулся обратно к берегу. Возможно, он также имел шквальную линию и это способствовало его странному поведению.

Если мы изучим эти вещи достаточно основательно, то будем в состоянии разобраться в явлении урагана. Мне кажется, что ближайшая программа действий должна заключаться в изучении ураганов вдали от земли, может быть, в центре Атлантического океана, далеко за Бермудами. Это должны быть обширные исследования путём полётов вдоль и поперёк ураганов, наблюдений и выяснения возможностей изменения ураганов или смещения их местоположения путём засева или какими-нибудь иными путями.

Я полагаю, что по мере роста наших знаний шансы получить возможность что-либо сделать для избежания вреда, наносимого ураганами, становятся очень большими.