

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА

Ф. Х. Лудлам*)

1. ВВЕДЕНИЕ. СВОЙСТВА СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

В высоких широтах летними месяцами, примерно через час после захода Солнца, порой можно наблюдать тонкие высокие облака. Столь долго оставаться освещенными лучами Солнца после его погружения за горизонт могут только облака, располагающиеся высоко в стратосфере.

Эти облака, получившие название «серебристых» (noctilucens), впервые были подвергнуты систематическому исследованию Иессе в Германии и Цераским в России, начиная с 1885 г. Не исключено, что подобные облака наблюдались и ранее, но известные публикации недостаточно определены для уверенности в этом (см. ¹ и ², где обсуждаются наблюдения Лавуазье). Имеются многочисленные сообщения о появлении ярких серебристых облаков в 1885, 1886 и 1887 гг., но в последующие годы наблюдения становятся немногочисленными, а сами явления ослабевают; после же 1894 г. облака наблюдаются только спорадически. Подробный обзор всех опубликованных до того времени сообщений был выполнен в 1934 г. Вестайном ³. Позднее Штермер ^{4,5} и Патон ⁶ произвели ряд наблюдений и измерений высот серебристых облаков.

Природа серебристых облаков и поныне остается не выясненной. В настоящей работе дается обзор полученных ранее сведений и сообщаются некоторые новые данные наблюдений, а также обсуждаются теории строения и образования серебристых облаков. При этом автор имеет целью стимулировать развитие подобного рода исследований в связи с Международным геофизическим годом.

а) Ф о р м а и ц в е т с е р е б р и с т ы х о б л а к о в

По внешнему виду серебристые облака напоминают тонкие, распадающиеся пиррусы-стратусы, без ниспадающих градообразных форм, характерных для многих ледяных облаков (рис. 1—3). Имеется тенденция к образованию протяженных слоев, хотя часть неба, на которой они доступны наблюдению, часто сжимается в узкий сегмент у горизонта. Наиболее тщательная классификация форм серебристых облаков выполнена Гришиным ⁷, различающим следующие формы:

1. Т у м а н о п о д о б н ы е и л и р а з л и т ы е (nebula). Между более резко выраженными деталями иных форм часто наблюдается туманоподобная очень тонкая бесструктурная вуаль, едва светящаяся слабым белым или голубым светом. Согласно Гришину разлитые формы часто могут быть обнаружены опытным наблюдателем как слабое свечение суме-

*) Tellus 9, № 3, 341 (1957).

речного неба и могут появляться за полчаса до облаков с определенной структурой.

2. Полосы. Под этим названием известны длинные, более или менее прямые, или же слегка искривленные гряды с размытыми краями, тянущиеся на сотни километров в длину. Они появляются протяженными



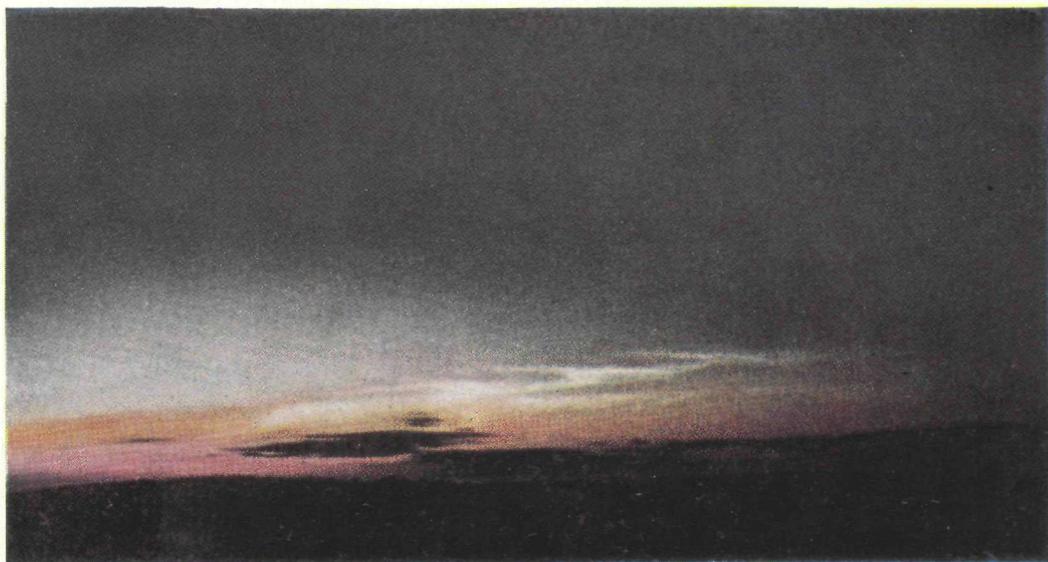
Рис. 1. Серебристые облака на северном небе. Торста 13 января 1955 г. 00 ч. 25 м. В верхней правой части фотографии над яркими деталями видны темные «тени».

группами, внутри которых гряды примерно параллельны друг другу. Сколько-нибудь заметных изменений в структуре деталей со временем не наблюдается. Поперек полос или ответвляясь от них могут появляться более мелкие гряды, нередко сильно изогнутые и перекрученные.

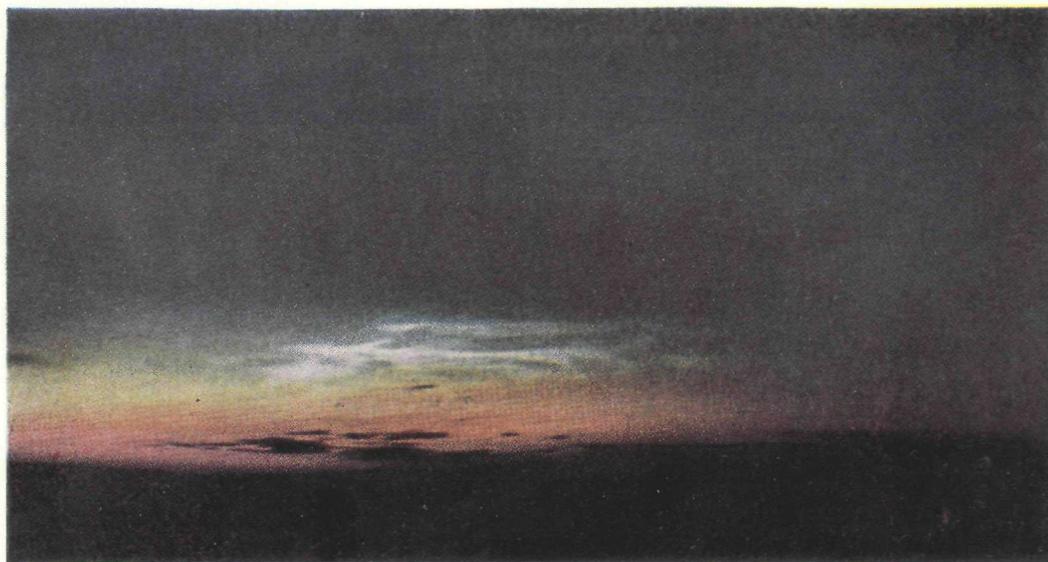


Рис. 2. Валы серебристых облаков. Торста 13 августа 1955 г. 01 ч. 55 м.

3. Валы. Когда серебристые облака располагаются вблизи горизонта, то нередко можно видеть группы довольно резко выраженных волн или валов. Расстояния, отделяющие пары соседних валов, составляют около 10 км. Обычно валы имеют тенденцию располагаться поперек направления вытянутости полос, однако их ряды могут заметно различаться по направлению даже в соседних участках неба. Когда валы распола-

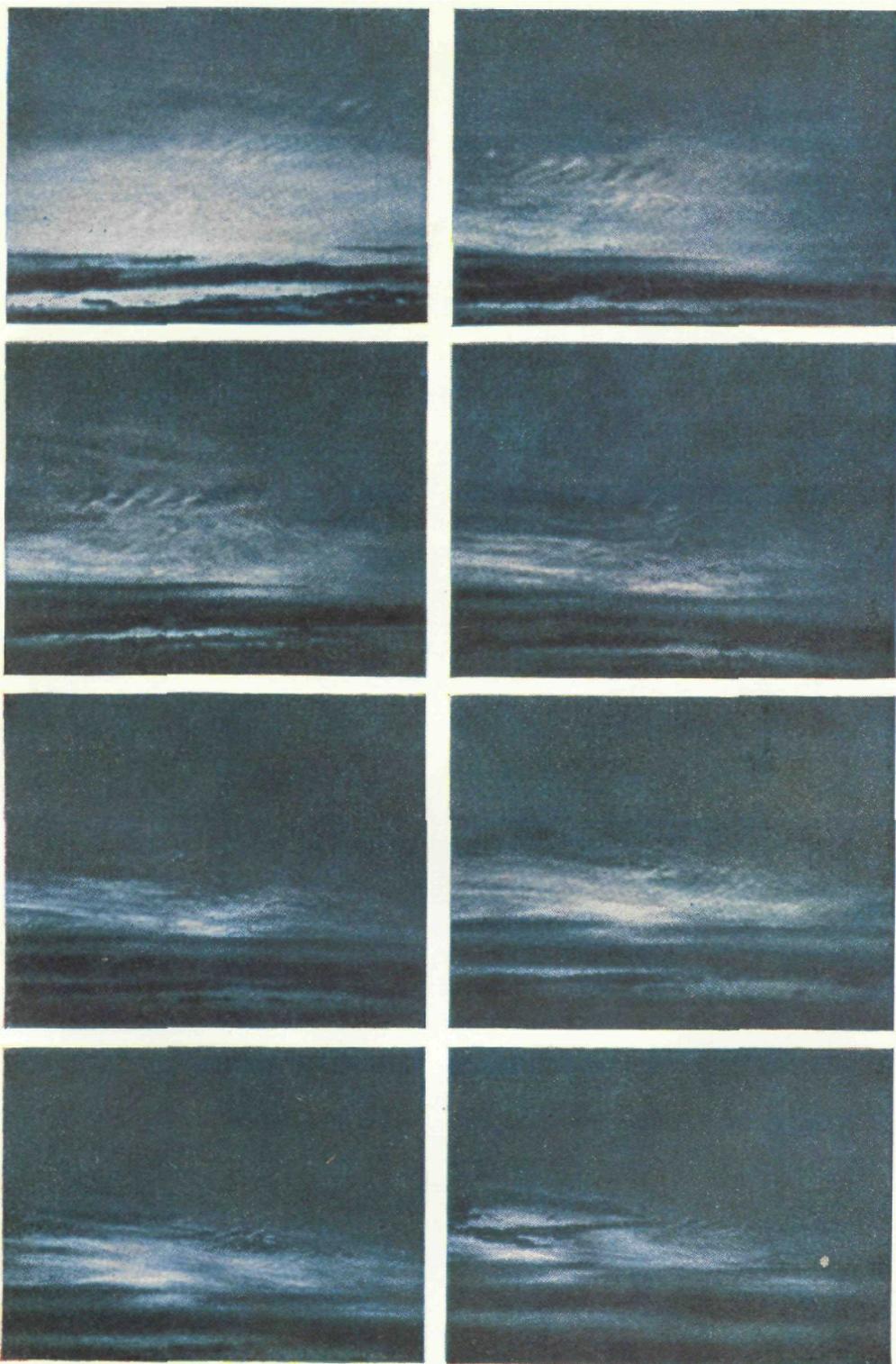


a



b

Рис. 3, *a* и *б*. Серебристые облака в северо-северо-восточной части неба (*a*) 9 августа 1955 г. в 23 ч. 40 м. и (*б*) 10 августа 1955 г. в 00 ч. 10 м.



6

Рис. 3е. Серебристые облака на северо-западном горизонте над Торста 13 августа 1956 г. Последовательность снимков, показывающая развитие явления, сделана через 5-минутные интервалы между 22 ч. 10 м. и 22 ч. 50 м. среднего местного времени. Правый край снимков примерно соответствует направлению на север. Экспозиции и направление съемочной камеры несколько варьировали от снимка к снимку. Снимок заимствован из статьи G. Witt, *Tellus* 9, 3, 365 (1957).

гаются поперек полос, часть образующего полосы материала собирается в гребни валов. В некоторых случаях валы образуются из разлитых форм. В отличие от полос, малые гряды и валы могут изменять свои формы и расположение и даже появляться и исчезать в течение немногих минут.

Временами можно наблюдать и мелкомасштабную зазубренность почти не различимую невооруженным глазом, которому облако представляется почти непрерывным. Гришин отмечает также волнообразные искривления или возмущения различных частей серебристых облаков, и

4. Вихри, обычно малой кривизны, которые могут быть обнаруживаемы в полосах, зазубринах и порой в разлитых формах. Вихри образуют дуги самых различных протяженностей, вплоть до замкнутых колец или воронок с темным центром.

Классификация Гришина была разработана на основе наблюдений, выполненных с 1948 по 1953 г. Недавно была произведена киносъемка последовательных стадий существования серебристых облаков, убедительно выявившая волнообразные формы и эволюцию многих из структурных деталей. Наиболее полных сведений о природе внутренних движений и преобразованиях, претерпеваемых серебристыми облаками, следует, по-видимому, ожидать именно от кинофильмов подобного рода.

Цвет серебристых облаков обычно белый. Вдали от горизонта они часто приобретают серебристый, слегка голубоватый оттенок, тогда как вблизи горизонта их оттенок становится желтоватым и даже оранжевым.

Согласно Гельмгольцу, Штермеру и Астаповичу (см. ⁸), их спектр подобен спектру дневного света — в нем отчетливо присутствуют фраунгоферовы линии и не обнаруживается лишней излучения. По-видимому, свет от облаков — это попросту рассеянный солнечный свет, но с некоторым преобладанием голубого, по сравнению с красным. Патон ⁶ однажды наблюдал медленное изменение цвета части серебристого облака от ярко-голубого до белого.

Временами серебристые облака поразительно ярки. В 1885 и 1886 гг. они были порой достаточно ярки, чтобы образовывать заметные тени и делать доступным чтение обычной печати. Сообщения 1908 г. говорят ⁹ о «необычайно сильном свете, таинственном и очень импозантном, в ясные летние ночи». Патон ¹⁰ упоминает явление, во время которого записи можно было читать, не прибегая к искусственному освещению. Тем не менее облака обычно очень тонки и вызывают лишь едва ощутимое ослабление света видимых сквозь них звезд. При явлениях средней интенсивности в Швеции облака были сфотографированы на мелкозернистых панхроматических фотопластинках (чувствительностью 28° по Шайнеру) с экспозициями, варьировавшими от примерно 1 (при депрессии Солнца 6°) до 100—500 сек. (при депрессии Солнца 11—12°,5) с апертурой 5,6. Облака хорошо видны сквозь голубой светофильтр, но блекнут при наблюдении сквозь красный. Поэтому последний, обычно употребляемый при фотографировании циркусов, не следует применять при фотографировании серебристых облаков.

Свет от серебристых облаков очень сильно поляризован, таким же образом, как и свет неба. Это свойство иногда используют для различения тонких серебристых облаков от циркусов, слабо освещенных рассеянным светом сумеречного неба.

б) Условия появления серебристых облаков

Прежде господствовало мнение, что серебристые облака наблюдаются только в области, расположенной между примерно 45 и 62° сев. широты (см., например, ⁶). Однако они наблюдались в течение десяти ночей,

приходящихся на июль и август месяцы 1954 и 1955 гг., на полевой станции Международного Метеорологического института (Стокгольм), находящейся в Торста близ Остерзунда (центральная Швеция) на $63^{\circ}15'$ сев. широты.

В ряде случаев облака были видны в северной части неба всего на $1-2^{\circ}$ выше горизонта, что соответствовало расстоянию от 800 до 900 км. Таким образом, эти облака простирались на север по крайней мере до окрестностей Северного Мыса, т. е. 71° сев. широты (возможности видеть

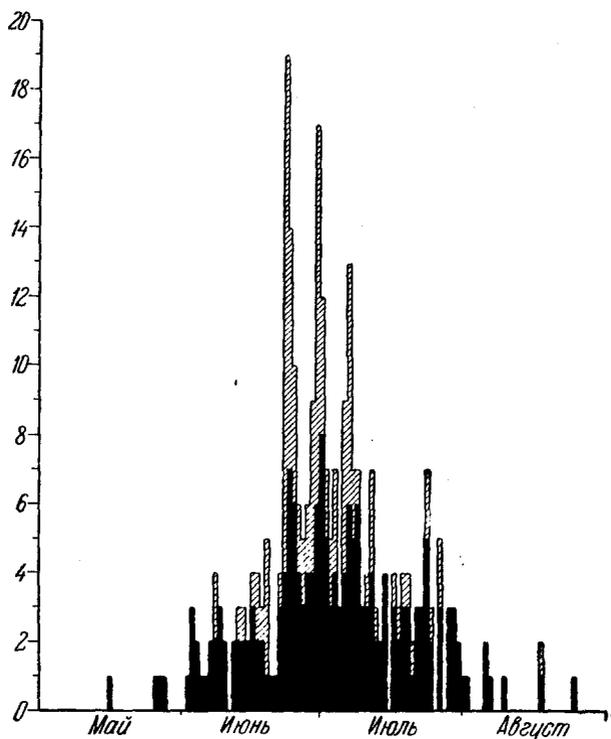


Рис. 4. Количество лет, во время которых серебристые облака наблюдались в данную дату в период 1885—1933 гг. (зачерненная гистограмма), и количество сообщений о наблюдениях в данную дату серебристых облаков, поступивших за тот же период (штрихованная гистограмма) — по Вестайну.

облака на столь больших расстояниях можно ожидать только в условиях очень чистого воздуха, часто осуществляющихся в этом географическом районе). Таким образом, необнаружение ранее серебристых облаков севернее 62° сев. широты обусловлено, вероятно, только отсутствием там достаточно ревностных наблюдателей.

В равной мере было бы удивительным, если бы полное отсутствие сообщений о наблюдениях серебристых облаков в течение ряда лет означало бы их действительное отсутствие в эти годы. Убывание числа сообщений после 1887 г., возможно, явилось частично следствием уменьшения общего интереса к самому явлению. Патон отмечает ⁶, что записи на обсерватории Бек Невис, на которой велись ежечасные наблюдения с 1883 до 1904 г., показывают, что серебристые облака были видны очень часто и отмечались как «жемчужные цырусы», «светящиеся серебристо-голубым светом». Патон сам, ведя наблюдения в течение периода с 1939 по 1955 г., видел

серебристые облака по крайней мере один раз в год, за исключением 1942 и 1944 гг. (частное сообщение). Если эти наблюдения добавить к сделанным Штермером, Мальзью (цитируется в ⁵) и Шпангенбергом, то мы обнаружим, что, начиная с 1932 г., серебристые облака наблюдались ежегодно, не считая двух названных лет, когда сообщения отсутствуют. Поэтому кажется правдоподобным, что серебристые облака появляются где-нибудь на больших высотах каждое лето, но часто они остаются невидимыми, вследствие ли неблагоприятной для наблюдения погоды или недостатка интереса со стороны наблюдателей, и что порой они становятся аномально протяженными и интенсивными, привлекая к себе внимание. Такими особыми периодами повышенной интенсивности являются, по-видимому, периоды с 1885 по 1892 г., с 1908 по 1911 г., с 1932 по 1935 г. и, возможно, с 1953 по 1955 г.

Серебристые облака наблюдались в северном полушарии с конца мая до середины августа и, согласно Вестайну (не дающему, однако, ссылок на источники), в южном полушарии—в период года, сдвинутый примерно на 6 месяцев относительно указанного для северного полушария.

Рис. 4, заимствованный из обзора Вестайна, показывает, что серебристые облака наблюдаются чаще после летнего солнцестояния, чем до него.

Когда облака сильно развиты, они становятся видимыми уже через 15 минут после захода Солнца и охватывают большую область неба, простираясь почти до юго-восточного горизонта. По мере того как Солнце погружается под горизонт, освещенная область облаков сокращается, превращаясь в сравнительно узкую зону над сумеречной дугой по обе стороны солнечного вертикала. С течением времени эта зона перемещается вместе с солнечным вертикалом в северную часть неба, где в полночь верхний край освещенной области достигает своего нижнего положения. Затем, по мере приближения рассвета, она продолжает перемещаться на северо-восток, все более и более вновь вытягиваясь к зениту и, наконец, исчезает примерно за полчаса до восхода Солнца. Если явление выражено не так резко, то облака появляются на северо-западе примерно через час после захода Солнца и исчезают на северо-востоке примерно за столько же времени перед его восходом. Только в редких случаях облака были видны выше 10° над горизонтом.

Исключая случаи крайней интенсивности серебристых облаков, последние чаще бывали видны после полуночи, чем до нее, даже несмотря на то, что число наблюдателей ко второй половине ночи, вообще говоря, заметно уменьшалось. В период 1883—1884 гг. серебристые облака наблюдались в вечерние часы 6 раз, а в предутренние—33 раза.

в) Высота серебристых облаков

Цераский в 1895 г., Покровский в 1897 г. (см. ⁸), Иессе ¹², Штермер ⁵ и Патон ¹³ измеряли высоту серебристых облаков путем фотографирования их из двух пунктов, отстоящих друг от друга на большое расстояние. Цераский получил для высоты облаков приближенное значение 79 км, а Покровский нашел, что их высота равна 82 км. Иессе использовал для своих измерений базу длиной 35 км и летом 1889 г. произвел определение высот 108 деталей облаков, идентифицируя их на парах фотографий, одновременно полученных с концов этой базы. Среднее из найденных им значений равнялось 82,8 км. Когда эти данные были объединены с результатами других измерений, выполненных летом следующего года, то среднее значение оказалось равным 82,1 км, тогда как индивидуальные значения располагались в интервале от 79 до 90 км.

Штермер использовал в тех же целях свою сеть камер для исследования полярных сияний, отстоящих друг от друга на расстоянии 47,65 и 105 км. В двух случаях в 1932 г. он из 18 измерений нашел среднюю высоту 81,8 км и из 19 измерений—81,1 км. В третьем случае, имевшем место в 1934 г., из 41 измерения была найдена средняя высота 82,2 км, причем индивидуальные значения располагались в интервале от 78 до 85 км.

Патон также использовал камеры, предназначенные для изучения полярных сияний. Эти камеры, отстоявшие друг от друга на расстоянии 27,6 км вдоль линии, шедшей почти параллельно меридиану, оказались, к сожалению, очень неудобно расположенными относительно облаков. Полученное Патоном значение высоты около 89 км.

Данные измерений, таким образом, хорошо согласуются между собой. Оценки, основанные на измерениях углового возвышения над горизонтом ближайших различимых деталей и на предположении, что они освещены лучами Солнца, касательными к поверхности Земли, приводят к меньшим значениям высот, варьирующим примерно от 30 до 70 км.

г) Скорость перемещения серебристых облаков

Иессе провел многочисленные измерения движения серебристых облаков и нашел, что оно почти всегда происходит из некоторого направления между севером и востоком и весьма быстро—со скоростью, достигающей 100—200 м/сек¹⁴.

В 1932 г. Штермер наблюдал облака, двигавшиеся с северо-востока со скоростью 44—55 м/сек, а в 1935 г. он же оценил скорость их движения с востока на запад как близкую к 80 км/сек. Штермер при этом цитирует⁵ результаты измерений, приведенных в Советском Союзе в 1925 г., когда наблюдались облака, двигавшиеся из азимута 013° со скоростью 229 м/сек. Хвостиков⁸ упоминает о том, что по данным произведенных в Советском Союзе измерений скорость серебристых облаков варьировала от 50 до 135 м/сек.

Согласно данным Иессе в дополуночное время облака движутся преимущественно с северо-востока, тогда как после полуночи начинают преобладать движение с востока-северо-востока. Штермер предположил¹, что изменение скорости может иметь место вблизи границы земной тени.

2. СВОДКА НАБЛЮДЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В ТОРСТА В 1954 И 1955 ГГ.

В приводимую ниже сводку наблюдений, выполненных в Торста, близ Остерзунда, включены также сведения о случаях, когда серебристые облака не были видны, несмотря на поиски их при, по-видимому, благоприятных условиях видимости. Указываемое время соответствует шведскому декретному времени (среднее гринвичское время плюс 1 час), которое с точностью до нескольких минут совпадает с местным временем. Склонение Солнца указывается в скобках, следующих за каждой датой наблюдений. Скорости облаков определялись из теодолитных наблюдений в предположении, что облака находились на высоте 80 км. Цифры, следующие за азимутом, указывают высоту облаков над горизонтом.

18—19 июля 1954 г. (21.0°)

Облака впервые обнаружены на северо-востоке, 20° в 23 ч. 22 м. и позднее появлялись в различных частях неба между NNW и E вплоть до 30°. Валу были вытянуты с востока на запад. Около 00 ч. 40 м. было выполнено четыре успешных измерения, давших следующие значения

скоростей: $003^{\circ}55$ м/сек., $021^{\circ} 70$ м/сек., $009^{\circ} 66$ м/сек., $011^{\circ} 65$ м/сек. Облака наблюдались также в Стокгольме с 24 ч. 00 м. до 01 ч. 00 м. между N и NNE (рис. 5).

20—21 июля 1954 г. (20,8°)

Хорошо выраженные облака появились после 23 ч. 00 м., покрыв практически все небо севернее зенита, преимущественно в виде очень длинных пререгулярных гряд, вытянутых с севера на юг. Некоторое количество валов на востоке имело то же направление. В 00 ч. 12 м. облака были видны на NNW ниже 6° , отливая серебром на фоне простиравшегося до примерно 10° пурпурного света. Измерение дало значение скорости $345^{\circ} 86$ м/сек. В 00 ч. 35 м. облака простирались до 18° над горизонтом в направлении SSW и исчезли в 02 ч. 00 м.

24 июля 1954 г. (20,0°)

До 23 ч. 30 м. облаков не обнаружено.

29—30 июля 1954 г. (18,9°)

Облака слабо видны позади страто-кумулясов, темного восточнее N, 5° в 23 ч. 45 м. Позднее длинные гряды и валы появились в направлении NE, около 10° .

16—17 августа 1954 г. (13,9°)

Серебристые облака появились в 23 ч. 00 м. в дуге, простиравшейся от WNW до NNE с минимальным и максимальным возвышениями над горизонтом, равными $2,2$ и 7° (где они резко исчезали в иссиня-черном небе), в направлении NNW в 23 ч. 35 м. и были еще видны в 00 ч. 10 м. Измерение скорости, выполненное в 23 ч. 42 м., дало значение $053^{\circ} 55$ м/сек.

17, 19 и 22 августа 1954 г. (13,6, 13,0 и 12,0°)

До 24 ч. 00 м. облака отсутствовали.

18 августа 1954 г. (13,3°)

До 23 ч. 00 м. облака отсутствовали.

29 августа 1954 г. (9,6°)

До 22 ч. 00 м. облака отсутствовали.

18—19 июля 1955 г. (21,0°).

Между 23 ч. 45 м. и 00 ч. 35 м. легкие гряды были видны около зенита, вплоть до 40° на юг и до 10° между W и NNE. В поле зрения теодолита в течение десятиминутного периода нельзя было уловить ни малейшего движения гряд.

23—24 июля 1955 г. (20,0°)

В 23 ч. 40 м. на северо-востоке появились легкие гряды, простиравшиеся с севера на юг и примерно на высоте 30° над горизонтом на юго-востоке легкие гряды, вытянутые с востока на запад. В 24 ч. 00 м. легкие лоскутообразные облака с валами появились на юго-востоке на высоте 60° ; они двигались из азимута 355° со скоростью 70 м/сек. В 00 ч. 15 м. на NW 25° и ENE 45° появились новые гряды. Повторное измерение скорости, более надежное, чем предыдущие, дало значение $022^{\circ} 80$ м/сек. В 01 ч.



Рис. 5. Серебристые облака в северо-северо-восточной части неба. Стокгольм 19 июля 1954 г. около 00 ч. 30 м.

10 м. облака исчезли, но на востоке 25° оставались еще видимыми две длинные легкие гряды.

25—26 и 26—27 июля 1955 г. ($19,7^\circ$ и $19,5^\circ$)

До 00 ч. 30 м. облаков не обнаружено.

27—28 июля 1955 г. ($19,2^\circ$)

В 22 ч. 50 м. на N—NNE 3° появилась тонкая гряда; вскоре появилась другая на 6° и чуть ниже 3° стали вырисовываться обрывки валов. В 23 ч. 25 м. облака захватили область до $7,5^\circ$; создано отчетливое впечатление, что облака возникают и распадаются, просуществовав около 20 минут. С 23 ч. 45 м. до 00 ч. 40 м. были видны только следы, тянувшиеся с NNW до NNE на высоте от $3,5^\circ$ до $4,6^\circ$.

29—30 июля 1955 г. ($18,8^\circ$).

До 00 ч. 30 м. облаков не было.

31 июля—1 августа 1955 г. ($18,3^\circ$)

В 22 ч. 45 м. на северо-северо-востоке 7° стали видны бледные гряды, становившиеся постепенно ярче и больше. Наиболее длинные гряды были вытянуты на ENE и вблизи горизонта постепенно изгибались на NNW; поперек них располагались многочисленные короткие гряды и несколько валов. К 23 ч. 30 м. облака распространились на область неба от NNE до ENE от $1,7^\circ$ до 10° . Выше облаков, тотчас за границей ярких гряд, небо было темнее, как если бы гряды бросали на него тени. В 23 ч. 50 м. было измерено движение облаков: $344^\circ 36$ м/сек. В 00 ч. 19 м. и 00 ч. 23 м. измерения были повторены в том же участке неба и, по-видимому, с не меньшей надежностью; они дали $238^\circ 45$ м/сек и $243^\circ 38$ м/сек. Направление вытянутости валов оказалось 293° . После полуночи облака стали слабеть и в 00 ч. 40 м. оставались только их следы.

2 августа 1955 г. ($17,8^\circ$)

До 23 ч. 15 м. облаков не было.

9—10 августа 1955 г. ($15,8^\circ$)

Серебристые облака появились на севере в 23 ч. 30 м. и к 23 ч. 50 м. распространились на область неба от NNE до ENE и от $2,0^\circ$ до $5,0^\circ$. Два измерения скорости дали $325^\circ 13$ м/сек (в 24 ч. 00 м.) и $341^\circ 16$ м/сек (в 00 ч. 25 м.). К 00 ч. 40 м. облака захватили область от $3,2^\circ$ до $13,4^\circ$, но стали тоньше; в течение этого промежутка времени они были резко ограничены с северо-северо-востока. В 01 ч. 45 м. оставались следы на ENE 11° и 6° . Фотографии облаков показаны на рис. 3

12—13 августа 1955 г. ($15,0^\circ$)

Облака были впервые обнаружены в 23 ч. 30 м. В полночь они простирались с NNE до ENE, до высоты $4,3^\circ$; получасом позже они распространились к северу со следами на NW и их верхний край достиг $6,2^\circ$. Охваченная ими область неба продолжала перемещаться на запад и ее верхний край подниматься; в 01 ч. 35 м. облака раскинулись между NNW и NNE вплоть до $12,8^\circ$. Наблюдалось много групп превосходно выраженных валов (рис. 1 и 2) и вновь были заметны «тени» тотчас над верхними границами некоторых из наиболее ярких гряд (рис. 1). После 02 ч. 00 м. облака стали бледнеть и сокращаться в размерах и к 02 ч. 25 м. остались только следы на северо-западе. Измерения скоростей дали следующие результаты: 01 ч. 00 м.— $031^\circ 36$ м/сек, 01 ч. 30 м.— $052^\circ 26$ м/сек и $049^\circ 60$ м/сек, 01 ч. 50 м.— $054^\circ 90$ м/сек. Ускорение представляется реальным, поскольку

при наблюдении в теодолит движение в поле зрения было на позднейшей стадии заметно быстрее, чем ранее.

21—22 августа 1955 г. (12,1°)

Серебристые облака отсутствовали.

23, 24, 25, 26 августа 1955 г. (от 11,4° до 10,4°)

До 23 ч. 30 м. серебристые облака отсутствовали.

Общие замечания

В течение двух лет было наблюдеено 2 слабых, 3 средних и 5 ярких случаев появления серебристых облаков. Примечательно, что в промежутке между последовательными появлениями облаков они иногда не были видны, несмотря на, по-видимому, превосходные условия видимости. Возможно, что в некоторых из этих случаев наблюдения, хотя и продолжавшиеся почти до полуночи, были недостаточно продолжительны, особенно если учесть, что согласно предшествующим наблюдениям имеется отчетливая тенденция к более яркой выраженности явления во второй половине ночи. Точно так же после полуночи облака обычно бывают видны дольше, чем в вечерние часы.

Стоит отметить, что облака располагались преимущественно в части неба, находящейся восточнее севера; это имело место даже в тех случаях, когда они впервые появлялись до полуночи, т. е. когда Солнце было западнее. В некоторых случаях область, охваченная облаками, была резко ограничена, причем их граница не определялась непосредственно границей земной тени.

Осуществить надежные измерения скорости облаков при помощи теодолита отнюдь не просто, вследствие трудности подыскания подходящих деталей, сохраняющих свои индивидуальности и размеры в течение одной или двух минут. Некоторые из бросающихся в глаза деталей, скажем, места пересечения или соединения двух гряд, могут перемещаться со скоростью, отличающейся от скорости ветра.

3. УСЛОВИЯ, ПРИ КОТОРЫХ СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА МОГУТ БЫТЬ НАБЛЮДАЕМЫ

Предполагается, что наблюдения серебристых облаков ограничены летними месяцами в средних и высоких широтах вследствие того, что только там и в это время геометрические условия позволяют облакам достаточно долго оставаться освещенными лучами Солнца после его захода. В низких широтах в течение всего года Солнце быстро опускается за горизонт и период, в течение которого облака могли бы находиться в благоприятном для наблюдения освещении, резко сокращается. Изменения условий видимости в зависимости от сезона для различных участков земного шара могут быть при некоторых предположениях рассчитаны, как это описывается ниже.

Допустим, что наблюдатель, находящийся в точке O (рис. 6), может видеть облако, расположенное на высоте 80 км по дуге AB , вырезаемой в вертикале Солнца углами возвышения a и b , когда Солнце погрузилось

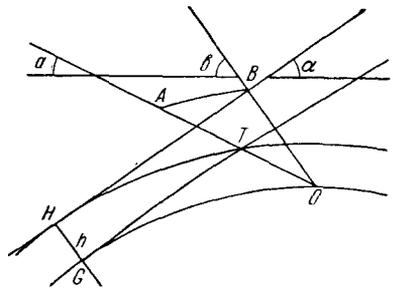


Рис. 6. Геометрические условия, при которых серебристые облака могут быть видимыми.

под горизонт на угол α . Солнечные лучи касаются земной поверхности в точке G . Однако предполагается, что свет настолько ослабляется, проходя сквозь приземные слои воздуха, что только лучи, минуящие приземный слой воздуха толщиной h и касающиеся его верхней границы в точке H , осветят облако достаточно ярко, чтобы сделать его видимым. С другой стороны, очевидно, что облако не будет видимо далее точки A , поскольку на линии зрения окажется достаточно длинный столб воздуха, освещенный прямыми лучами Солнца, и детали облака утонут в потоке рассеянного света, образующего сумеречную дугу.

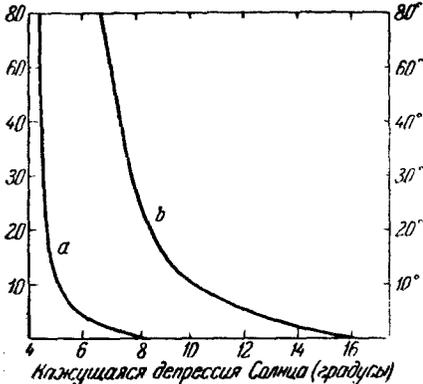


Рис. 7. Угловые возвышения верхней и нижней границ области вертикала Солнца, в которой могут быть видимыми серебристые облака, в зависимости от кажущейся депрессии Солнца.

Углы a и b зависят от угла погружения Солнца α , от предполагаемой высоты облаков и от положения вершины приземного рассеивающего слоя. Их можно определить, рассчитав пути в атмосфере лучей OA и OB , а также солнечных лучей GT и HV , касающихся земной поверхности и внешней поверхности приземного рассеивающего слоя. Вследствие того, что путь этих лучей сквозь атмосферу велик, необходимо учесть кривизну Земли и принять во внимание нормальную атмосферную рефракцию (хотя последняя сравнительно мало существенна).

Значение h желательно определить из наблюдений верхней и нижней границ серебристых облаков. Штермер^{4,5} нашел высоту земной тени из своих измерений положения верхнего края облаков B . Несмотря на пренебрежение рефракцией, он получил таким путем хорошие приближенные значения h ; его результаты варьировали от 29 до 50 км. Очевидно, существенно только нижнее значение, ибо в ряде случаев в положении B вообще могло не быть облаков. Тем не менее в шести измерениях, сделанных в каждом из двух случаев, Штермер получил значения, которые довольно согласно легли между 30 и 45 км. Этот удивительный результат означает либо то, что имеет место очень существенное ослабление солнечного света даже высоко в стратосфере, либо то, что облака вовсе не достигли границы земной тени.

Мною были рассчитаны значения h для лучей, освещавших ближайших и наиболее удаленных детали облаков, наблюдавшихся в Торста, в предположении, что их высота равнялась 80 км, и принимая во внимание рефракцию; результаты приведены в таблице. Она подтверждает штермеровские значения и предположение, что только изредка ближайших детали облаков находятся в положениях, соответствующих значениям h , меньшим 30 км. Значения h , соответствующие наиболее удаленным деталям, по-видимому, существенно меньше и, исходя из того, что наименьшее значение наиболее существенно, в дальнейших вычислениях я использовал значение $h=16$ км. Следует предполагать, однако, что соответствующее значение может часто нуждаться в удвоении, если речь идет о границах области видимости облаков. Необходимо отметить, что рассеяние света, ограничивающее видимость облаков, происходит в нижней стратосфере, тогда как тропосфера влияет на условия наблюдения только путем ослабления света пылевыми массами или его экранирования облаками.

Рис. 7 показывает соотношение между видимой депрессией Солнца α и углами a (значение $h=16$ км) и b ($h=30$ км), а на рис. 8 представлено

Таблица

Наименьшие высоты h над уровнем Земли лучей, освещающих ближайшие и наиболее удаленные детали серебристых облаков

Дата	Время	Депрессия Солнца в градусах	Азимут и возвышение облаков в градусах	h в км
Ближайшие детали:				
18.7.54	24 ч. 00 м.	5,7	360,30	54
21.7.54	00 ч. 35 м.	6,0	,90	45
16.8.54	23 ч. 35 м.	12,8	330,07	12
19.7.55	00 ч. 05 м.	5,7	180,40	43
23.7.55	24 ч. 00 м.	6,8	,90	34
27.7.55	23 ч. 25 м.	7,5	360,07.5	69
31.7.55	23 ч. 30 м.	8,5	360,10	55
9.8.55	23 ч. 50 м.	10,8	040,05	37
10.8.55	00 ч. 25 м.	11,0	031,06.3	34
	00 ч. 40 м.	10,7	035,13.4	10
13.8.55	00 ч. 40 м.	11,4	033,06.3	32
	01 ч. 15 м.	10,6	015,09.9	30
	01 ч. 40 м.	9,7	007,12.8	29
	02 ч. 15 м.	8,0	353,10.0	45
Наиболее удаленные детали:				
19.7.54	00 ч. 25 м.	5,7	360,04	12
21.7.54	00 ч. 15 м.	6,0	340,06	16
16.8.54	23 ч. 35 м.	12,8	320,02.2	55
19.7.55	00 ч. 05 м.	5,7	360,10	16
27.7.55	23 ч. 30 м.	7,5	360,03.0	18
31.7.55	23 ч. 30 м.	8,5	020,01.7	23
9.8.55	23 ч. 50 м.	10,8	023,03.3	38
10.8.55	00 ч. 22 м.	11,0	023,02.9	37
	00 ч. 40 м.	10,7	024,03.2	36
13.8.55	00 ч. 40 м.	11,4	006,01.2	32
	01 ч. 15 м.	10,6	360,01.7	31
	01 ч. 40 м.	9,7	007,01.8	26
	02 ч. 15 м.	8,0	344,01.6	25
			008,04.7	25

соотношение между расстоянием до серебристого облака на высоте 80 км и его угловым возвышением над горизонтом. Из рисунка 7 следует, что

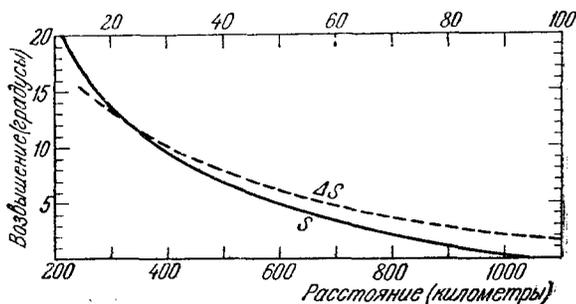


Рис. 8. Расстояние S серебристых облаков, находящихся на высоте 80 км, как функция возвышения над горизонтом, и изменение ΔS при изменении возвышения на 1° .

облака должны быть видны только тогда, когда Солнце находится между 5 и 16° под горизонтом.

4. ИЗМЕНЕНИЯ УСЛОВИЙ ВИДИМОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ШИРОТЫ, СЕЗОНА И ВРЕМЕНИ СУТОК

Истинная депрессия γ Солнца, являющаяся функцией широты φ , склонения Солнца δ и истинного солнечного времени τ , определяется уравнением:

$$\sin \gamma = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau. \quad (1)$$

Для данной широты можно построить изофлеты склонения, откладывая по оси абсцисс истинную депрессию Солнца, а по оси ординат—истинное солнечное время. Эти изофлеты могут быть, далее, наложены на график

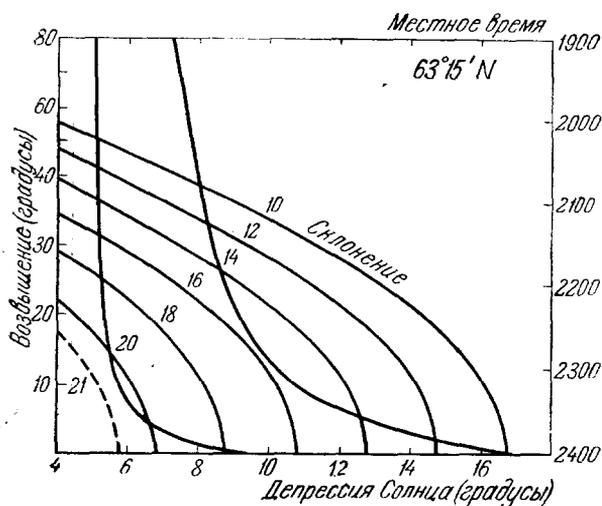


Рис. 9. Диаграмма для отыскания верхней и нижней границ области видимости серебристых облаков в вертикале Солнца для наблюдателя, находящегося на $63^{\circ}15'$ сев. широты в функции истинной депрессии Солнца (в предположении рефракции у горизонта, равной $0,6^{\circ}$), или в функции местного времени и склонения Солнца.

да содержатся, например, в Морском Альманахе). Отыскивая на графике точку, соответствующую данным склонению и времени, и опуская из этой точки перпендикуляр на ось абсцисс, мы найдем, что этот перпендикуляр пересечет кривые a и b в точках, соответствующих положениям верхней и нижней границ области видимости облаков на сумеречном небе.

Форма кривых a и b на рис. 7 свидетельствует о том, что верхняя и нижняя границы видимости облаков в вертикале Солнца быстро перемещаются в районе зенита, но их движение резко замедляется при приближении к горизонту. Это иллюстрируется рис. 10, показывающим положения этих границ в зависимости от времени для некоторых сезонов на $63^{\circ}15'$ сев. широты. Эти кривые выявляют также, что наиболее благоприятный для наблюдения сезон приходится примерно на середину лета.

В качестве меры удобства наблюдения серебристых облаков разумно выбрать длительность времени, в течение которого должны быть видны облака, находящиеся в вертикале Солнца на высоте 10° над горизонтом. Из рис. 9 видно, что в течение этого времени истинная депрессия Солнца

рис. 7, как это показано на рис. 9, если воспользоваться тем, что истинная депрессия Солнца превышает видимую на $0,6^{\circ}$. Пользуясь рис. 9, нетрудно найти величину возвышения над горизонтом, начиная с которого станут видимыми находящиеся в солнечном вертикале серебристые облака, в зависимости от сезона и истинного солнечного времени. (Истинное солнечное время находится из следующего соотношения: истинное солнечное время = гринвичскому среднему времени + 4 минуты на каждый градус долготы к востоку от Гринвича—уравнение времени. Таблицы значений δ и уравнения времени для каждого дня года

меняется от $5,75^\circ$ до $10,7^\circ$. Сам интервал времени можно тогда рассчитать при помощи уравнения (1), подставляя в него соответствующие значения γ для данных широт и сезонов.

Этим способом мы построили рис. 11, показывающий зависимость продолжительности периода видимости (до полуночи) от времени года для $63^\circ 15'$ сев. широты. В течение большей части года этот период близок к часу; его продолжительность резко возрастает до пикового значения, близкого к трем часам, при склонении Солнца 15° , и круто падает до нуля

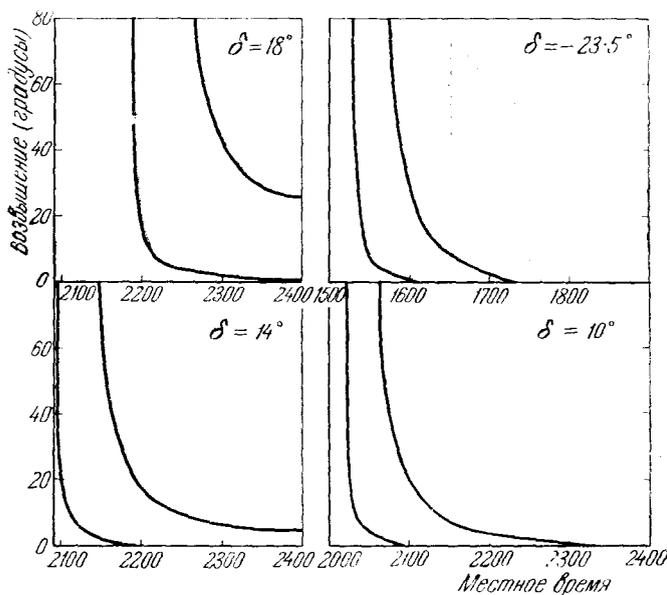


Рис. 10. Положение верхней и нижней границ области видимости серебристых облаков в вертикале Солнца для наблюдателя на $63^\circ 15'$ сев. широты для четырех времен года.

при склонениях, превышающих 21° , что соответствует одному месяцу до и после летнего солнцестояния, когда Солнце даже в полночь погружается за горизонт менее, чем на $5,75^\circ$. В более низких широтах наиболее благоприятным для наблюдений сезоном является летнее солнцестояние, как это видно из рис. 12. На этом рисунке кривые изображают изменения длительности дополуночного периода видимости серебристых облаков в течение двух месяцев, следующих за летним солнцестоянием, на широтах $63^\circ 15'$, 56° и 30° . На более низких широтах период изменяется в течение года очень мало и лежит между половиной и тремя четвертями часа.

Такая длительность периода вполне достаточна для опытного наблюдателя, чтобы обнаружить облака, если они присутствуют. Тем не менее, согласно Вестайну, сообщения об облаках никогда не поступали с широт, меньших 45° . Сообщения из столь южных районов, полученные из России, относятся к совершенно исключительным условиям—это было в 1908 г. после падения Большого Тунгусского метеорита, которое будет нами обсуждаться ниже. Если исключить этот случай, то, по-видимому, с широт, расположенных южнее 50-й параллели, имеются только очень малочисленные сообщения; если мы примем во внимание, что облака, виденные на этих широтах, крайне редко простирались по небу более чем на несколько градусов над северным горизонтом, то весьма вероятным

кажется предположение, что серебристые облака не существуют на широтах, меньших примерно 55° .

На рис. 11 и 12 сплошными линиями изображены участки кривых, приходящиеся на сезоны, в течение которых облака наблюдались в действительности. Наблюдения в Торста были использованы для кривой,

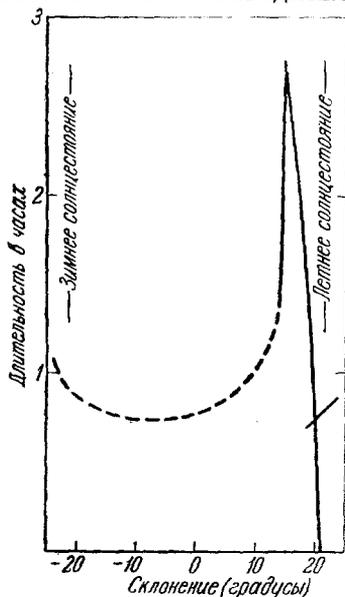


Рис. 11. Дополуночный период, в течение которого серебристые облака, находящиеся в вертикале Солнца на высоте 10° над горизонтом, остаются видимыми в функции склонения Солнца. Длинная кривая относится к наблюдателю на $63^\circ 15'$ сев. широты и проведена сплошной линией на участке, соответствующем сезону, в течение которого облака наблюдались в Торста. Короткая пересекающая кривая относится к 50° сев. широты и протяженность ее соответствует времени, в течение которого облака наблюдались между 49° и 52° сев. широты.

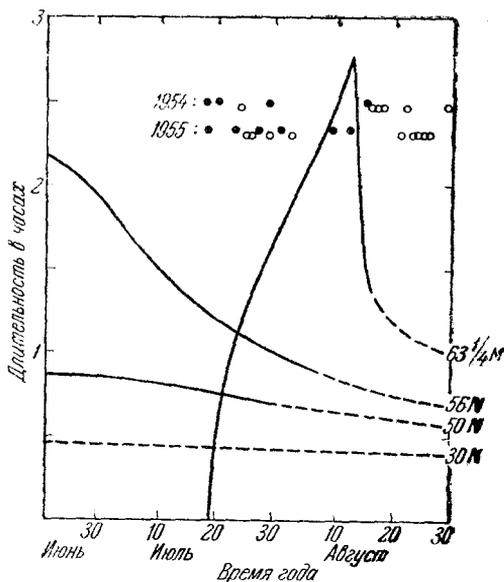


Рис. 12. Дополуночный период, в течение которого серебристые облака, находящиеся в вертикале Солнца на высоте 10° над горизонтом, остаются видимыми, в функции времени года. Непрерывные части кривых соответствуют сезону, в течение которого облака наблюдались в Торста ($63 \frac{1}{4}^\circ$ N), в Эдинбурге (56° N) и между 49 и 52° сев. широты (50° N). Кружки в верхней части рисунка показывают случаи, когда облака наблюдались в Торста (черные кружки) и не наблюдались, несмотря на благоприятные условия видимости (светлые кружки).

соответствующей $63^\circ 15'$ сев. широты, наблюдения Патона (Эдинбург) — для 56° сев. широты, а для кривой, отвечающей широте 50° N, — все наблюдения, произведенные в интервале широт между 49 и $52,5^\circ$ N, о которых сообщает Вестгайн. Очевидно, что в Торста и Эдинбурге облака перестали быть наблюдаемыми еще тогда, когда условия их видимости, в соответствии с принятым выше критерием, намного превосходили те, при которых наблюдались облака на более низких широтах.

В Торста в ясные дни во время зимнего солнцестояния облака, находящиеся на высоте 10° над горизонтом, оставались бы видимыми в течение целого часа как утром, так и вечером, и едва ли могли не привлечь к себе внимания. Представляется также существенным, что облака были наблюдаемы в Торста вплоть до несколько более поздних сроков, чем когда бы то ни было в Эдинбурге. На этом основании я выдвинул гипотезу, что серебристые облака, помимо того, что они появляются преимущественно после,

а не до летнего солнцестояния, ограничены в смысле области распространения с юга примерно широтой 55° в июле и примерно 70° N в конце августа, и не появляются в этих районах в иные сезоны, кроме лета. Эти обстоятельства предполагают некоторый метеорологический контроль за появлением серебристых облаков.

5. РАЗМЕРЫ И КОНЦЕНТРАЦИЯ ЧАСТИЦ В СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКАХ

Заметная степень поляризации света, идущего от серебристых облаков, указывает, что

$$\pi r < 0,5 \mu,$$

где r — преимущественный радиус частиц, образующих облака. С другой стороны, рассеяние света на частицах не может быть релеевским, ибо в противном случае облака были бы голубыми. В действительности же, согласно наблюдениям, они белые, хотя иногда и имеют голубоватый оттенок. Это показывает, что

$$\pi r > 0,025 \mu.$$

Комбинируя эти неравенства, получаем

$$10^{-6} < r < 10^{-5} \text{ см.}$$

В Швеции было найдено, что когда Солнце погружается примерно на 6° под горизонт, экспозиции, необходимые для фотографирования облаков на мелкозернистых панхроматических пластинках (чувств. 28° по Шайнеру), составляет около 5 сек. при $f : 5,6$; если же, однако, депрессия Солнца была близка 12° , то оказывались необходимыми экспозиции до 200 сек. Таким образом, можно положить, что экспозиции около 100 сек. при названной апертуре являются мерой яркости типичных облаков. Эти сведения позволяют оценить концентрацию облачных частиц следующим образом.

Предположим, что рассеивающие частицы образуют слой толщиной h , освещенный солнечными лучами, угол падения которых равен Θ . Пусть $f(h) \ll 1$ означает рассеянную слоем долю солнечного света в условиях его нормального падения. Тогда при косом освещении слоя эта доля равна $f(h) \sec \Theta$. Следовательно, мощность света, рассеянного единицей поверхности облачного слоя, не зависит от Θ и равна $sf(h)$, где s — мощность прямого солнечного излучения. Если частицы малы, то вперед и назад рассеивается одинаковое количество света.

Если поверхность облака рассеивает согласно закону Ламберта, то ее яркость $B_{\text{обл}}$ будет независимой от направления зрения и

$$B_{\text{обл}} \sim \frac{1}{2} sf(h)_*$$

Для поверхности снега или какого-нибудь другого почти идеального рассеивателя, освещенного нормально к поверхности, доля рассеянной назад световой мощности (т. е. альбедо) равна единице. Таким образом, если B_s — яркость такой поверхности, освещенной Солнцем (т. е. $B_s \sim s$), то

$$\frac{B_{\text{обл}}}{B_s} = \frac{1}{2} f(h).$$

Теперь мы предположим, что отношение этих двух яркостей обратно отношению экспозиций, необходимых для их фотографирования, равному, по нашим измерениям, примерно 10^{-6} , что получается из экспозиций 100 сек. при $f : 5,6$ и $1/200$ сек. при $f : 32$ соответственно.

Поперечное сечение рассеяния для частиц названных выше размеров примерно равно их геометрическому поперечному сечению πr^2 , так что если n означает концентрацию облачных частиц, то

$$f(h) = hn\pi r^2 = 2 \cdot 10^6.$$

Толщина h слоя, занимаемого серебристыми облаками, составляет, по-видимому, несколько километров. Например, если валы образуются вследствие конвективных процессов, подобных тем, которые вызывают образование валов в тропосферных облаках, то толщина охваченного этими процессами слоя должна быть равна ¹⁴ $\frac{d}{2,7}$, где d — расстояние между валами, близкое, согласно наблюдениям, к 10 км. Таким образом, валы, видимо, образуются в слоях толщиной около 4 км, более же плотные и широкие гряды и полосы, вероятно, даже толще. Если мы положим для h значение 6 км, то

$$n \cong \frac{10^{-12}}{r^2},$$

т. е.

$$n \cong 10^{-2} \text{ см}^{-3}, \text{ если } r = 10^{-5} \text{ см},$$

$$n \cong 1 \text{ см}^{-3}, \text{ если } r = 10^{-6} \text{ см}.$$

Если плотность частиц предположить равной 2,5, то пространственные плотности облачного материала будут равны соответственно 10^{-16} и 10^{-17} г/см³. Эти оценки следует рассматривать как относящиеся к средним условиям, причем погрешность вряд ли превышает один порядок величины. Было бы очень желательно произвести лучшие оценки путем тщательного количественного исследования обычных облаков*).

6. ВЕЩЕСТВО СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Серебристые облака могут либо принадлежать к числу ледяных облаков, либо составляющие их частицы должны быть образованы из каких-то других веществ.

В озоновом слое и выше него, вплоть до высот около 55 км, давление насыщенных паров воды при господствующей там сравнительно высокой температуре превышает общее давление воздуха, вследствие чего конденсация паров оказывается невозможной. На еще больших высотах, однако,

*) Приведенные в этом параграфе рассуждения и полученные на их основе оценки крайне примитивны и не могут претендовать на достоверность, но крайней мере в пределах двух-трех порядков величин. В частности, вследствие недостаточности сведений о характере поляризации света, рассеянного серебристыми облаками, а также недостаточной выясненности вопроса о связи между характером поляризации и размерами рассеивающих частиц, приводимую автором оценку $\pi r < 0,5\mu$ никак нельзя признать сколько-нибудь надежной. Необоснованно примитивны рассуждения о рассеивающей способности облачного слоя. Ошибочно утверждение, что рассеяние вперед и назад одинаково; в действительности можно ожидать различия в несколько раз. Заведомо неприменим к серебристым облакам (вследствие их прозрачности) закон Ламберта, вытянутость же индикатриссы рассеяния должна быть очень ошутимой, так как измерения ведутся практически при очень малых углах рассеяния.

Мы перечислили далеко не все возражения, заставляющие отнестись к приведенным выше оценкам с крайней осторожностью. Отметим, что предлагаемое автором апробирование методики на обычных облаках вряд ли рационально, хотя бы из-за различия в размерах облачных частиц. Значительно более надежных оценок размеров и концентрации облачных частиц, можно, по-видимому, ожидать только на основе исследования спектральной зависимости яркости и поляризации рассеянного серебристыми облаками света. (Прим. переводчика)

температура падает с увеличением высоты и достигает минимума типа второй тропопаузы на уровне, близком к 80 км, т. е. примерно на той высоте, где наблюдаются серебристые облака. В этой области высот конденсация возможна, если воздух достаточно влажен и температура достаточно низка.

В нижней стратосфере на средних широтах воздух практически всегда очень сух и водяные облака никогда не наблюдаются, за исключением специфических волновых облаков, иногда образующихся в зимнее время над норвежскими и некоторыми другими горами. Зондирования, проводившиеся Британской метеорологической службой, показали¹⁵, что, начиная 3—5 км над тропопаузой, точка инея стремится к постоянному значению около 193° абс., что соответствует относительной влажности менее 1%. Если этот воздух путем переноса или перемешивания подвять до уровня 80 км, то соотношение компонент порядка 10^{-3} г/кг сохранится и плотность водяных паров будет равна примерно $3 \cdot 10^{-14}$ г/см³ (на высоте 80 км плотность воздуха¹⁶ близка к $3 \cdot 10^{-8}$ г/см³). Чтобы это значение соответствовало плотности насыщенных паров над поверхностью льда, т. е. чтобы стала возможной конденсация, необходимо, чтобы температура была ниже, примерно 145° абс. (указанная величина получена путем экстраполяции зависимости плотности насыщенных паров от температуры при помощи формулы, которая грубо справедлива в интервале температур от 173 до 273° абс.¹⁷). Температура на высоте 80 км была получена из анализа данных измерений, проведенных при помощи ракет, и из наблюдений метеоров. Хотя ее значение нельзя рассматривать как особо точное, и хотя оно получено преимущественно из измерений, проведенных на меньших широтах, чем те, на которых наблюдаются серебристые облака, можно считать, что средняя температура на соответствующей высоте равна 220—230° абс. Векслер отмечает¹⁸, что температура не может быть ниже 170° абс., а при этом значение плотности насыщенного водяного пара близко к 10^{-9} г/см³. Поэтому можно утверждать, что на уровне 80 км конденсацию можно было бы ожидать только в том случае, если бы температура стала аномально низка или если бы воздух был аномально влажен, содержа в значительной мере пары воды. Тем не менее, если рассматривать серебристые облака как очень редкое явление, то на этом основании нельзя исключить возможность их образования в результате конденсации.

Следующие обстоятельства делают ее, однако, невероятной. Быстрая изменчивость внутренних деталей облаков и присутствие валов заставляет предполагать, что слой, в котором образуются облака, хорошо перемешан и находится в сильном движении. Поскольку слой имеет в толщину несколько километров, температура в его верхней части должна быть градусов на двадцать, или около того, меньше температуры у дна слоя. Так как давление насыщенного пара очень быстро убывает с уменьшением температуры, протращенная плотность конденсата в облаке, заполняющем такой слой, должна быть близкой к плотности насыщенного пара у его нижней границы, т. е. при температуре конденсации. Даже если бы эта температура была столь низка, что равнялась бы названной выше величине 145° абс., то соответствующая средняя плотность ледяного облака была бы близка к 10^{-14} г/см³, т. е. на два порядка больше, чем значение, полученное из оптических свойств облака.

Наконец, рассматривая вопрос о концентрации облачных частиц, мы все время исходили из условий, соответствующих не гомогенной среде, а присутствию ядер конденсации. Поэтому, если рассматривать серебристые облака как ледяные, то необходимо особо выяснить вопрос о природе частиц, образующих эти ядра. Поэтому естественно обратиться

к серьезному рассмотрению теорий образования серебристых облаков, рассматривающих последние как скопления пыли, привнесенной на соответствующие высоты с земной поверхности или из межпланетного пространства.

7. СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА И ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Предполагается, что интенсивность и широкое распространение серебристых облаков в период с 1885 по 1894 г. были связаны с извержением Кракатау в августе 1883 г. Не вызывает сомнения, что эруптивными облаками было внесено в нижнюю стратосферу огромное количество пыли. Последнее, носившее взрывной характер извержение Кракатау, произошло поздним вечером 26 августа, но уже ранним утром следующего дня капитан английского судна «Медей», находившегося на расстоянии 75 миль от вулкана, увидел над ним гигантское облако и путем угловых измерений оценил высоту его вершины в 27 км, а позднее в 34 км (Report of Krakatoa eruption, 1888 г.). Поскольку ветер на соответствующих высотах сносил облако на запад, в сторону от судна, нет оснований полагать, что здесь могла иметь место переоценка. Пыль из вулканического облака затем рассеялась по земному шару и в течение трех месяцев была видна в Западной Европе в виде тонкого слоя, заметного даже при полном дневном свете, и обуславливавшего красочные сумеречные явления. Оценки высоты этого пылевого облака, основанные на определении депрессии Солнца в момент, когда на облаке исчезают красные цвета зори, дали значения, варьировавшие между 15 и 30 км, причем большие значения были получены преимущественно в ранний период существования облака, а меньшие значения—через несколько месяцев. Среди наблюдателей был Иессе, который нашел для средних высот значения от 12 до 15 км, позднее уменьшившиеся до 10 км.

Подобные же, хотя и меньшие по плотности, пылевые облака были недавно замечены летчиками на примерно тех же высотах над Западной Европой в июле и августе 1953 г.¹⁹, после извержения на Аляске, и вновь в апреле—мае 1955 г., вслед за извержением на Камчатке²⁰. Появление облаков было также отмечено наземными наблюдателями, производившими оценки их высот (Лудлам, неопубликовано). Поэтому кажется правдоподобным, что вулканическая пыль внедряется преимущественно в нижнюю стратосферу, но можно допустить, что некоторая ее доля, достаточная для образования серебристых облаков, диффундирует в более высокие слои.

Примечательно, что первые наблюдения серебристых облаков в период 1885—1894 гг. были сделаны только через два года после появления вулканической пыли в Европе. Заслуживает внимания и то, что период 1880—1887 гг. был, как это заметил Вестайн, периодом особенно частых и ярких появлений метеоров и комет, а также то, что за мощным извержением Катмай в 1912 г. не последовало сколько-нибудь заметного увеличения числа сообщений о появлении серебристых облаков. С другой стороны, Шпангенберг¹¹ пытался связать более частые сообщения об их появлении в 1932—1935 гг. с извержением, происшедшим в 1932 г. в Кордильерах и сопровождавшимся выбросом пылевого облака до высоты 25 км. Однако мощные вулканические извержения происходят достаточно часто, чтобы можно было бы выделить какие-то особые периоды, а сообщения о серебристых облаках поступают столь нерегулярно и столь сильно зависят от благоприятной погоды во время соответствующих кратких сезонов, что вряд ли можно удивляться невозможности установить тесную связь между вулканической деятельностью и появлением серебристых облаков.

8. СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА И МЕТЕОРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Утром 30 июня 1908 г. в Сибири упал огромный метеорит. Его масса была оценена в несколько десятков тысяч тонн и вызванный им взрыв был зарегистрирован барографами в Англии. В течение той же самой ночи многими наблюдателями в России, Швеции, Дании, Германии и Англии были замечены необычайно яркие серебристые облака. Г. А. Кларк наблюдал в Эбердине внезапное появление тонких облаков, сопровождавшееся заметным посветлением сумерек примерно через два часа после захода Солнца. Из этих наблюдений Уиппл²¹ рассчитал, что восточная составляющая скорости движения облаков была близка к 85 м/сек , если предположить, что облака возникли в месте падения метеорита. Очевидно, именно к этому особому случаю и относятся русские сообщения о серебристых облаках, поступившие из столь южных районов, как 45° сев. широты³. В метеорологических документах США и Южной Европы нельзя найти никаких сведений о серебристых облаках или необычно ярких сумерках.

Свидетели падения Большого Сибирского (Тунгусского) метеорита сообщают, что последний оставил в атмосфере «легкий голубоватый след» и что меньшие полосы, оставленные метеоритом в атмосфере и достаточно мощные, чтобы быть видимыми, отливали бледно-серебристым цветом, характерным для серебристых облаков. Отсюда можно заключить, что частицы, образовавшие метеорный след, имели примерно те же размеры, что и частицы в серебристых облаках. Это заключение находит свое подтверждение в работе Фесенкова²², в которой обсуждаются свойства следа, оставленного другим большим метеоритом, с массой, оцениваемой в несколько сотен тонн, который упал также в Сибири 12 февраля 1947 г. Куски раздробленного метеорного тела были разысканы в маленьких кратерах, с помощью же миноискателей были обнаружены и извлечены из грязи многочисленные мелкие осколки, включая множество шариков радиусом до $15\text{--}20 \mu$, образованных в результате отвердевания мелко-разбрызганного железа. В начале след, оставленный этим метеоритом в атмосфере, имел в диаметре около $1,5 \text{ км}$ и был настолько плотен, что заслонял Солнце. Но вскоре, в результате диффузии, его плотность уменьшилась и сквозь него стал виден диск Солнца. Облако частиц, таким образом, было гораздо прозрачнее для красных лучей, чем для голубых. Из этих данных Фесенков находит, что диаметр частиц должен был быть меньше 10^{-5} см и что их концентрация в первоначальном следе составляла примерно $7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Поскольку общий первоначальный объем следа достигал 70 км^3 , он должен был содержать около 200 т железа. Если частицы имели диаметр заметно меньший, чем 10^{-5} см , то названные значения пространственной плотности и общей массы следа нужно существенно увеличить. Поэтому, если предположить, что серебристые облака состоят из частиц диаметром 10^{-5} см , причем их концентрация равна 10^{-2} см^{-3} , то поперечное сечение следа должно было бы увеличиться в диаметре до 7000 км , прежде чем средняя концентрация частиц упала бы до уровня концентрации частиц в серебристых облаках. Хотя наиболее плотная часть большого метеорного следа располагалась ниже 80-километрового уровня, очевидно, что такой след мог служить мощным источником, поставившим вещество для образования серебристых облаков уже раздробленным на мелкие частицы соответствующих размеров. Частицы эти, по-видимому, образовались в результате конденсации материала, испарившегося с поверхности раскаленного метеорита, а также, возможно, путем раскрашивания последнего.

Встречающиеся порой более крупные шарики представляют собой застывшие капли расплавленного вещества метеорита, избежавшие

испарения и достигнувшие Земли. Обычно их радиус колеблется от нескольких десятков до сотен микрон.

Метеоры столь больших размеров, как обсуждавшиеся выше, крайне редки. Недавно Боуэн²³ сообщил, что существует весьма тесная связь между появлением серебристых облаков и повторяющимися метеорными дождями. Боуэн сопоставил даты выпадания основных ежегодных июньских и июльских метеорных дождей по данным Ловелла и Клегга²⁴ с датами, на которые приходятся наибольшие количества сообщений о наблюдении серебристых облаков, в соответствии с приведенной на рис. 4 диаграммой Вестайна³. Этот рисунок содержит две диаграммы, построенные на основании данных, собранных Вестайном и относящихся к периоду 1885—1933 гг. Одна из диаграмм показывает полное количество лет, во время которых в данную дату были зарегистрированы серебристые облака, другая же—полное количество сообщений о наблюдении серебристых облаков, поступивших в соответствующую дату. Именно эта последняя диаграмма и была рассмотрена Боуэном. Она содержит ряд пиков, которые в семи случаях из восьми совпадают или на 1—2 дня предваряются датами выпадения основных метеорных дождей.

Некоторые авторы на этом основании заключили, что Боуэну удалось таким способом установить связь между обоими явлениями. Однако Уиппли и Хаукинс²⁵ обратили внимание, что использованные Боуэном даты выпадения ежегодных метеорных дождей были ошибочными и, что если использовать новейшие сведения об этих датах, то единственное отчетливое совпадение времени выпадения метеорного дождя с максимумом диаграммы Вестайна имеет место 30 июня, т. е. в случае, когда метеорный дождь слаб. В эту дату диаграмма Вестайна показывает 17 сообщений, 12 из которых, как явствует из рассмотрения таблиц, положенных в основу построения диаграммы, по-видимому, относятся к 30 июня 1908 г., т. е. к случаю падения Большого Тунгусского метеорита. Таким образом имеются все основания полагать случайным и это последнее совпадение. Точно так же не обнаруживается никакого соответствия, если рассматривать другую диаграмму Вестайна, показывающую количество лет (а не количество наблюдателей), во время которых были зарегистрированы серебристые облака; казалось бы, что она с большим основанием могла бы стать предметом обсуждения. Однако для образования пика на этой диаграмме достаточно 5 случаев, так же как на предыдущей диаграмме для этого было достаточно 7 сообщений. Поэтому реальность имеющихся на диаграмме пиков вызывает серьезные сомнения. Следует добавить, что данные, сведенные в указанные диаграммы, были получены в весьма широком интервале широт, внутри которого условия наблюдения в одну и ту же дату варьируют очень сильно. Так, например, даже если исключить пик 30 июня, диаграмма Вестайна показывает, что серебристые облака наблюдаются в конце июня заметно чаще, чем в другое время. Однако, если бы в нее были включены в достаточном количестве данные, полученные на высоких широтах, то этот максимум исчез бы, ибо в высоких широтах около летнего солнцестояния облака оставались бы невидимыми даже в случае их присутствия. Очевидно, что надежную основу для выявления связи между появлением серебристых облаков и другими явлениями могут создать только обширные ряды наблюдений, проведенных в одном и том же месте или, по крайней мере, на одной и той же широте, причем эти наблюдения должны включать случаи, когда облака не удалось обнаружить, несмотря на благоприятные условия видимости.

Наблюдения, сделанные в Швеции (рис. 12), свидетельствуют, что в периоды хорошей видимости бывают ясные ночи, когда серебристые облака заведомо не обнаруживаются, причем эти ночи вклиниваются между

ночами, во время которых серебристые облака успешно наблюдаются. При этом появление облаков не обнаруживает никакой видимой связи с метеорными потоками. Основной метеорный поток этого сезона—поток Персеид—настигает Землю впервые около 6 августа и имеет максимум примерно между 10 и 14 августа. Этот метеорный дождь, так же как и другие, длится несколько дней и не может быть связан с какой-нибудь определенной датой. Таким образом, существующие данные не дают никаких оснований для заключения о существовании какой бы то ни было связи между появлением серебристых облаков и выпадением метеорных дождей.

9. ЗАХВАТ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ЧАСТИЦ ЗЕМЛЕЙ

Частота появления видимых метеоров во время наиболее сильных метеорных дождей возрастает по сравнению с частотой появления спорадических метеоров примерно вдвое ²⁶, так что метеорные дожди, как возможный источник поступления в атмосферу материала для образования серебристых облаков, не представляются особо значительными по сравнению со спорадическими метеорами.

Видимые метеоры образуются частицами, преимущественно каменными или железо-никелевыми, с радиусом, превышающим примерно 100 μ . Эти частицы врываются в земную атмосферу со скоростями в несколько десятков *км/сек* и раскаляются. Частицы меньшего размера тоже плавятся, но излучают столь мало света, что остаются невидимыми для невооруженного глаза. Если же радиус частиц меньше нескольких микрон, то они тормозятся в атмосфере, не достигнув температуры плавления (1200—1700°) ^{27, 28}.

Более крупные метеориты оставляют позади себя след, нередко остающийся видимым в течение нескольких минут, и даже долее, как темный дымок, или, при подходящем освещении, как бледная полоска, весьма напоминающая по виду серебристые облака. По-видимому, также многие метеорные тела (особенно у слабых метеоров) имеют малую плотность (от 0,2 до 1,0 *г/см³*) и разрушаются под действием аэродинамического давления и нагревания во все более и более измельчающуюся крошку ²⁹, так что следует думать, что они имеют пористую и хрупкую структуру и состоят, возможно, из минеральных осколков, сцементированных «льдом» таких веществ, как вода, углекислота и метан. Однако частицы размером 10^{-5} — 10^{-6} *см*, входящие в состав серебристых облаков, должны были бы либо поступать в атмосферу, имея уже соответствующие размеры, либо образовываться в атмосфере путем конденсации паров в следах метеоритов, имевших размеры, превышающие несколько микрон. Видимые пути большинства метеоров располагаются на высотах между 100 и 50 *км* над уровнем моря, так что продукты их конденсации распределяются в слое, охватывающем и сверху и снизу уровень существования серебристых облаков.

Скорость падения малых частиц на этих уровнях была оценена Линком ³⁰, использовавшим закон Стокса с поправками Милликена. Он получил значение, пропорциональное радиусу r и плотности δ частицы и обратно пропорциональное плотности ρ воздуха. На уровне 80 *км* скорость падения для частиц радиусом 10^{-5} *см* составляет, по его данным, несколько сантиметров в секунду. С другой стороны, средний свободный пробег молекул воздуха на этих высотах близок к 4 *м.м.*, т. е. много больше, чем размеры частиц. Поэтому представляется предпочтительным воспользоваться для расчета скорости падения эмпирическими данными Кнудсена ³¹, измерившего сопротивление K , оказываемое разреженным воздухом движению шарика. Измерения охватывали давления вплоть до 0,14 *дин/см²*,

и результаты их были выражены Кнудсеном в виде формулы

$$K = 6\pi\eta r v (1 + 0,683\kappa + 0,354\kappa e^{-1,845\kappa})^{-1},$$

где η — коэффициент вязкости, $\kappa = \frac{\lambda}{r}$, λ — средняя длина свободного пробега, получаемая из соотношения

$$\lambda = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{8}} \eta}{0,30967 p \sqrt{p_1}},$$

p — давление и p_1 — плотность воздуха при давлении 1 дина/см.

Если $\kappa \ll 1$, то приближенно выражение для K приобретает вид

$$K = 6\pi\eta r v \kappa$$

откуда

$$v = \kappa v_s,$$

где v_s — скорость падения, следующая из закона Стокса.

На уровне 80 км мы можем положить $T = 200^\circ \text{K}$, $\eta = 1,3 \cdot 10^{-4}$ г/см·сек и $p = 17 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$. При $p_1 = 1,74 \cdot 10^{-9}$ г/см³ получаем $\lambda = 0,37$ и для частиц с плотностью 2,5 г/см³

$$v = 4,2 \cdot 10^{-6} r^2 \kappa.$$

Если $r = 10^{-5}$ см, $\kappa = 3,7 \cdot 10^4$, то $v = 16$ см/сек. Если $r = 10^{-6}$ см, $\kappa = 3,7 \cdot 10^5$, то $v = 1,6$ см/сек.

Эти оценки отличаются менее, чем на 50% от значений, получаемых из обычной кинетической теории газов (Витт, частное сообщение).

Указанные величины могут служить побочным подтверждением того значения верхнего предела размеров частиц серебристых облаков, который был ранее получен на основе оптических данных. По-видимому, невероятно, чтобы облака могли иметь идентифицируемые в течение длительного времени детали, если скорость падения образующих их частиц достигает метров в секунду.

Принимая эти значения для скорости падения и обсуждавшиеся ранее значения для пространственной плотности серебристых облаков, мы можем рассчитать пространственную плотность метеорного материала, достаточную для образования этих облаков. Полученное таким способом значение плотности мы можем сопоставить с оценками, произведенными, исходя из того, что межпланетное вещество привносится в атмосферу из межпланетного пространства со скоростями примерно от 11 км/сек (скорость падения, обусловленная притяжением Земли) до примерно 70 км/сек (сумма орбитальной скорости Земли и скорости убегания от Солнца на расстоянии радиуса земной орбиты).

Из наблюдаемых свойств видимых метеоров можно получить распределение частиц по размерам в интервале радиусов от 50 м до 0,5 см. На основании экстраполяции этого закона распределения как в сторону меньших, так и в сторону больших размеров, Ловелл²⁶ оценил годовое количество выпадающего на Землю метеорного материала величиной около 500 тонн, что соответствует средней плотности метеорного вещества в межпланетном пространстве от 10^{-25} до 10^{-24} г/см³.

Если метеорное вещество в количестве, соответствующем наибольшей концентрации, проникнет в атмосферу Земли со скоростью 32 км/сек

и полностью превратится в частицы радиусом 10^{-6} — 10^{-5} см, обладающие тепловыми скоростями, то плотность последних на уровне 80 км будет составлять соответственно от $2 \cdot 10^{-18}$ до $2 \cdot 10^{-19}$ г/см³. Сравнивая эти величины со значениями, полученными из предположения, что серебристые облака образованы такими частицами (около 10^{-17} и 10^{-16} г/см³, соответственно), мы видим, что они меньше необходимого на один-три порядка величины. Значения сравниваемых величин, разумеется,отягощены погрешностями, могущими обусловить десятикратные расхождения. Однако полученные оценки плотности метеорного материала, по-видимому, скорее завышены, чем занижены. Отсюда с очевидностью следует, что обычные метеоры нельзя рассматривать как источник, могущий поставлять материал для образования серебристых облаков.

10. ЗОДИАКАЛЬНОЕ ОБЛАКО

Имеется ряд указаний на то, что в метеорных дождях количество очень малых частиц даже меньше, чем следовало бы из экстраполяции закона распределения частиц по размерам, справедливого для видимых метеоров. Возможной причиной этого является отделение мелких частиц от крупных при движении метеорных роев. С другой стороны, существуют также основания предполагать что количество захватываемых земной атмосферой микрометеоритов, слишком малых для образования видимых метеоров, намного больше, чем следовало бы ожидать из закона распределения. Эти свидетельства получены преимущественно из исследования внешней солнечной короны и зодиакального света.

Зодиакальный свет представляет собой клиновидную полосу слабого разлитого света, простирающуюся от горизонта вдоль эклиптики и видимую в темные часы ночи, когда погружение Солнца достигает примерно 17° . По интенсивности зодиакальный свет сравним со светом Млечного Пути (см., например, ³²). Его легко наблюдать в ясные безлунные ночи на малых широтах, где он простирается почти прямо к горизонту; в средних же и высоких широтах его наблюдения затруднены.

Интенсивность света растет по направлению к Солнцу и Ван-де-Хульст предположил ³³, что это возрастание продолжается непрерывно по мере продвижения к внутренним областям внешней короны Солнца.

Свет короны складывается из двух частей: сильно поляризованной и не содержащей спектральных линий *K*-компоненты и *F*-компоненты, которая содержит фраунгоферовы линии и полностью или почти деполаризована.

Интенсивность *K*-компоненты очень быстро убывает по мере удаления от Солнца, тогда как *F*-компонента ослабевает гораздо медленнее и становится доминирующей во внешней короне. Зодиакальный свет также содержит фраунгоферовы линии и, так же как *F*-компонента короны, приписывается рассеянию солнечного света облаками межпланетных частиц, располагающихся в плоскости эклиптики в виде довольно тонкого диска. В то время, когда Ван-де-Хульст высказал свое предположение, единственными существовавшими экспериментами в этой области были измерения интенсивности зодиакального света в интервале угловых расстояний от Солнца от 40 до 180° и интенсивности солнечной короны вплоть до $1^\circ 20'$ от Солнца. Недавно, однако, Рене и др. ³⁴ измерили интенсивности в интервале угловых расстояний от Солнца от 5 до 13° (с самолета, летавшего на высоте 10 км во время полного солнечного затмения). Их результаты подтвердили предположение Ван-де-Хульста и установили существование плавного перехода между свечением короны и зодиакальным светом.

Аллен³⁵ показал, что интенсивности внешней короны и зодиакального света, так же как и распределения интенсивностей в функции расстояния от Солнца и длины волны, могут быть объяснены рассеянием солнечного света частицами с радиусом около 10^{-3} см, концентрация которых, предполагаемая обратно-пропорциональной расстоянию от Солнца, и составляет на расстоянии Земли около $3 \cdot 10^{-15}$ см⁻³, что соответствует пространственной плотности $6 \cdot 10^{-23}$ г/см³. Его измерения во внешней короне показали, что релеевское рассеяние, которое должно было бы иметь место в случае более мелких частиц, не наблюдается. Напротив, имеются указания на покраснение *R*-компоненты вблизи Солнца. Недавно Блекуэлл³⁶ нашел существенно большее возрастание интенсивности по направлению к Солнцу в инфракрасной области спектра, чем в фиолетовой, что указывает на присутствие частиц с радиусом, превышающим примерно $2 \cdot 10^{-3}$ см. Ван-де-Хульст предположил, что распределение частиц по размерам подобно тому, которое имеет место для метеоритов, и что концентрация частиц однородна в пространстве. При этом он приписал возрастание интенсивности по мере приближения к Солнцу форме функции рассеяния, а не изменению концентрации частиц. Поскольку часть рассеивающего свет вещества сосредоточена в сравнительно крупных, менее эффективно рассеивающих частицах, Ван-де-Хульст оценил пространственную плотность рассеивающего вещества величиной $5 \cdot 10^{-21}$ г/см³, что существенно больше полученного Алленом значения $6 \cdot 10^{-23}$ г/см³. Если указанное Ван-де-Хульстом значение рассматривать как, вероятно, лучшее соответствующее действительности и полагать толщину пылевого облака в перпендикулярном эклиптике направлении равной, примерно 0,4 астр. единицы, то полная масса частиц внутри земной орбиты равна $5 \cdot 10^{-12}$ тонн, т. е. около 10^{-9} массы Земли.

Интересно проследить происхождение и судьбу этого материала. Уиппл³⁷ рассмотрел четыре возможных источника его образования, из которых существенными представляются только соударение астероидов и разрушение комет. Те из образующихся таким путем частиц, радиус которых меньше примерно $2 \cdot 10^{-5}$ см, изгоняются из солнечной системы давлением солнечного излучения. Более крупные частицы под действием эффекта Пойнтинга—Робертсона (см., например,³⁸) движутся с космическими скоростями по спиральным траекториям к Солнцу. Уиппл нашел, что для поддержания современной яркости внешней короны и зодиакального света необходим источник метеоритного материала мощностью около 1 тонны в секунду, и указал, что Фесенков ранее пришел к подобному же заключению на основе менее общей теории. Названная цифра может быть сопоставлена с количеством распыленного материала, образующегося в результате соударений тел в астероидном поясе, составляющим, по оценке Пиотровского³⁸, от 20 до 600 тонн в секунду. Вероятно, однако, что подавляющая часть этого материала представляет собой сравнительно крупные осколки. Согласно Уипплу⁴⁰ большинство малых частиц, образующих фотографические метеоры, происходит от кометных обломков (по модели Уиппла кометные ядра состоят из твердых частиц, сцементированных «льдом» таких веществ, как H₂O, NH₃ и CO₂, частично испаряющимся при сближении кометы с Солнцем, в результате чего комета, по мере своего движения по орбите, все более и более разрушается).

По оценке Уиппла частицы из числа кометных обломков, имеющих размеры, превышающие 10^{-2} см, подвержены с большой вероятностью разрушающим соударениям (согласно Эпику⁴¹ частицы более крупных, чем названный, размеров, кроме того, имеют мало шансов избежать захвата Юпитером, когда они пересекают его орбиту), но что кометный источник материала для ответственных за зодиакальный свет пылевых облаков

может поставлять этот материал в количестве примерно до 3 т в секунду, что вполне достаточно для поддержания существования пылевых облаков.

Существующие астрономические данные, хотя и довольно бедные, согласуются, таким образом, с существованием межпланетарных пылевых облаков, в которых частицы, в основном, имеют радиус 10^{-3} — 10^{-2} см и концентрация которых соответствует пространственной плотности около $5 \cdot 10^{-21}$ г/см³. Попадая в атмосферу, подобные частицы создавали бы очень слабые телескопические метеоры в количестве примерно в 10^4 раз больше, чем следовало бы из экстраполяции закона распределения частиц по размерам, найденного для видимых невооруженным глазом метеоров. До сих пор это огромное возрастание численности телескопических метеоров не было непосредственно наблюдаемо. Однако косвенные данные заставляют полагать, что прежние оценки количества захватываемого Землей метеоритного материала слишком занижены. Например, бомбардировка высотных ракет мелкими частицами (размером в несколько микрон) интенсивнее, чем ожидалось (см.¹⁶, стр. 22). Точно также обильнее, чем ожидалось, содержание железа и никеля в глубоководных осадках⁴² (значимость этих отложений была, однако, поставлена под сомнение см., например,⁴³), и количество магнитных материалов, преимущественно метеорного происхождения, выпадающих из атмосферы на поверхность почвы⁴⁴ (здесь также, однако, происхождение материала не достоверно; Шеффер⁴⁵ считает, что основная его масса имеет индустриальное происхождение).

Если доверять оценкам состава облаков, ответственных за зодиакальный свет, и если предположить, что частицы испаряются, попав в верхние слои атмосферы, причем испарившееся вещество вновь конденсируется в частицы радиусом 10^{-6} или 10^{-5} см, то пространственную плотность частиц на 80-километровом уровне следует, в соответствии с изложенными выше соображениями, оценивать величинами:

$$\begin{aligned} \text{для } r=10^{-6} \text{ см пространственная плотность} &= 10^{-14} \text{ г/см}^3, \\ \text{для } r=10^{-5} \text{ см пространственная плотность} &= 10^{-15} \text{ г/см}^3. \end{aligned}$$

Оба эти значения превышают найденную выше величину пространственной плотности серебристых облаков (10^{-17} и 10^{-16} г/см³ соответственно). Поскольку мы использовали оценки для плотности ответственных за зодиакальный свет облаков, полученные не Алленом, а Ван-де-Хульстом, и поскольку часть образующих их частиц достаточно мала, чтобы избежать испарения при впадении в атмосферу, оба значения следует признать скорее преувеличенными, чем преуменьшенными. Тем не менее можно заключить, что межпланетная пыль может служить поставщиком материала для образования серебристых облаков. Представляется также возможным, что если эта пыль содержит значительные количества железа, либо если она оказывается заряженной под воздействием солнечного излучения, то она будет проникать в земную атмосферу преимущественно на высоких широтах, следствием чего будет локальное возрастание ее концентрации.

11. ПЫЛЬ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Существуют и другие аргументы в пользу предположения о существовании значительных количеств пыли в стратосфере. Например, наблюдение земной тени во время лунных затмений свидетельствует, что атмосфера содержит экранирующий солнечный свет—агент вплоть до уровней, расположенных высоко в стратосфере. Линк³⁰ предположил, что этим агентом может быть метеорная пыль, оседающая с высот от 50 до 100 км на поверхность почвы. При фотографировании Марса и Венеры в ультрафиолетовых лучах получают изображения, размеры которых соответственно на 3÷6% и 2% превышают размеры изображений тех же планет, получаемые

в инфракрасных лучах. Согласно Линку³⁰ Фесенков и Менцель доказали, что этот факт не может быть объяснен как следствие молекулярного рассеяния света, но что он может быть следствием существования на соответствующих планетах подобных же слоев метеорной пыли. Меньшая величина гравитационной постоянной у рассматриваемых планет ведет к тому, что уровень возгорания метеоров располагается выше над поверхностью почвы, чем на Земле, и благоприятствует увеличению толщины пылевого слоя. С другой стороны, на Юпитере, например, толщина этого слоя могла бы быть всего несколько десятков километров и он не мог бы создать заметных эффектов. Буска и Свечка⁴⁶ сопоставили данные измерений величины земной тени на Луне во время лунных затмений. Усреднение данных 33 наблюдений показало, что размер тени примерно на 2% превышает размеры

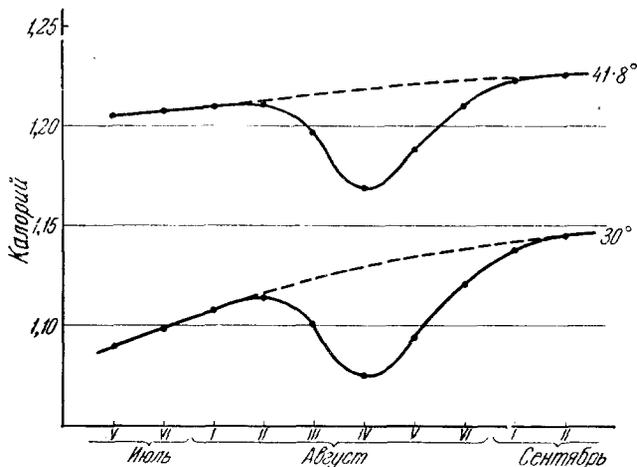


Рис. 13. Средняя напряженность солнечной радиации для каждых 5 дней для возвышения Солнца 30° (нижняя кривая) и 41.8° (верхняя кривая) из 3282 и 2239 наблюдений, выполненных в Якутске (1931—1942 гг.), Павловске (1913—1937 гг.), Курске (1928—1935 гг.), Ростове (1930—1937 гг.), Тбилиси (1928—1937 гг.), Ташкенте (1926—1937 гг.) и Самарканде (1931—1937 гг.), по Калинину.

Земли, причем индивидуальные значения колеблются между 1,7% и 2,5%. Буска и Свечка не смогли обнаружить никакого заметного соответствия между увеличением размеров, с одной стороны, и склонением Солнца или Луны, параллаксом Солнца или солнечной активностью, с другой, не сообщили о корреляции с метеорными дождями.

Из анализа наблюдений за интенсивностью солнечной радиации, выполненных на обсерватории Маунт-Вилсон в период 1908—1920 гг. Захаров⁴⁷ выявил ежегодное возрастание атмосферного поглощения на несколько процентов, длящееся около четырех недель, включая вторую половину августа. Это явление он связал с выпадением в середине августа метеорного дождя Персеид. Калинин⁴⁸ показал, что аналогичное убывание интенсивности солнечной радиации в тот же самый период года следует из актинометрических измерений, осуществленных широко раскинутой сетью многочисленных метеостанций Советского Союза (рис. 13), причем совпадение поразительно хорошее. Предполагая, что это явление обусловлено внедрением в земную атмосферу пылевых облаков, Линк⁴⁹ заключил, что радиус частиц должен быть около 10^{-5} см и что пыль прибывает в количествах, близких к тем, которые были получены выше в предполо-

жении захвата Землей межпланетной пыли, ответственной за явление зодиакального света.

Однако, поскольку оптическая плотность такого пылевого облака на несколько порядков величины превосходила бы плотность серебристых облаков, кажется удивительным, что их ежегодное появление остается невидимым и даже неизвестным. Пылевые облака от мощных извержений Кракатау (1883), М. Пеле (1902) и Катмаи (1912) вызвали более длительное, но примерно такое же по величине уменьшение интенсивности солнечной радиации, сопровождавшееся исключительно красочными сумеречными явлениями⁵⁰. К числу этих явлений, особо усиливающихся в такие возмущенные периоды, принадлежит пурпурный свет, обязанный своим происхождением частицам размерами в несколько микрон, находящимися

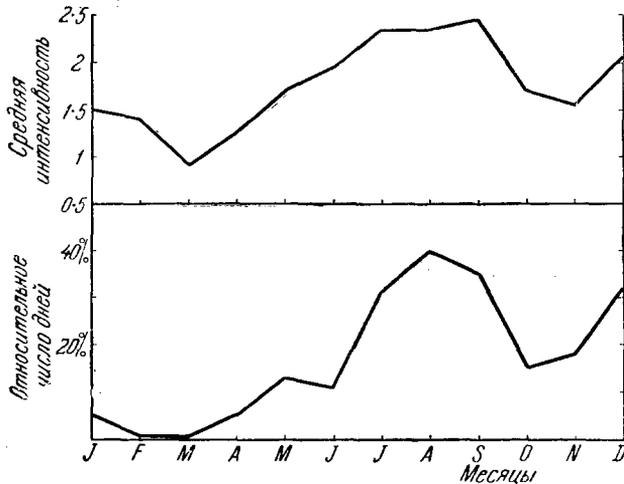


Рис. 14. Сезонные вариации средней интенсивности пурпурного света (в пятибалльной шкале) и относительного числа случаев аномально сильного пурпурного света за период 1905—1912 гг. в Берне (по Гринеру и Клейнерту.)

в нижней стратосфере. Заслуживает внимания, что рис. 14, заимствованный из книги Грюнера и Клейнерта⁵⁰, свидетельствует о значительно более частой повторяемости исключительно интенсивного пурпурного света в августе (когда, однако, и конвективный перенос пыли с поверхности почвы в атмосферу существенно увеличивается), чем в остальные времена года. Хотя, следовательно, наблюдения Захарова и Калитина могут потребовать иной интерпретации, их предположение заслуживает дальнейшего исследования. Можно отметить, что если помутнение атмосферы обусловлено появлением пылевого облака, то вытекающий из актинометрических наблюдений четырехнедельный срок, потребный для восстановления прозрачности, должен соответствовать времени выпадения из атмосферы основной массы содержащейся в ней пыли.

Прямые подтверждения присутствия скоплений пыли в нижней стратосфере содержатся в наблюдениях, выполненных с самолетов⁵¹, а также в данных фотометрического изучения сумерек⁵²; последние содержат убедительные указания на постоянное присутствие пылевых образований под 80-километровой температурной инверсией. Пенндорф⁵³ собрал экспериментальные данные о концентрациях частиц на различных уровнях в тропосфере, из которых следует, что быстрое убывание концентрации с высотой

прекращается, начиная примерно с 4 км, и что выше этого уровня отношение концентрации аэрозоля к плотности воздуха увеличивается с высотой (можно было ожидать, что вследствие перемешивания воздушных масс это отношение должно сохраняться одинаковым на различных уровнях). На этом основании Пенндорф предположил, что где-то на больших высотах должен существовать источник, поставляющий в тропосферу пылевые частицы. Этот вывод получил некоторую поддержку в наблюдениях концентрации частиц в водяных облаках верхнего яруса и в весьма эффективных перламутровых облаках, порой образующихся на высоте около 25 км над горами Норвегии. Из наблюдений венцов, видимых в свежесформированных цирусах, я заключил⁵⁴, что концентрация ледяных кристаллов в облаках составляет около 7 см^{-3} . Поскольку эти облака образовывались в восходящих воздушных течениях средней мощности, названная величина, по-видимому, соответствует полной концентрации ядер конденсации на этих высотах; она находится в согласии со значением, полученным Пенндорфом из самолетных измерений солнечной радиации. Таким образом, на уровне облаков верхнего яруса (около 10 км) отношение $C = n/\rho$,

где n — концентрация малых частиц, имеет значение, близкое $\frac{7}{5} \cdot 10^{-4} \text{ г}^{-1}$ или $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ г}^{-1}$. По наблюдениям Штермера⁵⁵ угловой радиус первого красного кольца в венце, возникавшем вокруг луны в перламутровых облаках, был равен 15° , что указывает на сферические облачные частицы диаметром около 2,5 м. При температуре этих облаков около -80° концентрация воды, конденсируемой при подъеме воздушной массы на несколько сот метров выше уровня конденсации, составляет около 10^{-10} г/см^3 . Если это количество распределено равномерно между капельками соответствующего радиуса (об этом свидетельствует чистота дифракционных цветов), то их концентрация должна была быть близкой к 1 см^{-3} . Поскольку эти облака также образуются в восходящих течениях средней мощности, мы можем вновь полагать, что эта величина равна полной концентрации ядер конденсации на соответствующем уровне. На высоте 25 км плотность воздуха примерно равна $6 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3$, так что отношение $C = 1,6 \cdot 10^4 \text{ г}^{-1}$. На высоте, на которой наблюдаются серебристые облака, плотность воздуха близка к $3 \cdot 10^{-8} \text{ г/см}^3$; концентрация же частиц, согласно приведенным выше оценкам, варьирует от 10^{-2} см^{-3} (для радиуса 10^{-5} см) до 1 см^{-3} (для радиуса 10^{-6} см); соответствующие значения C суть $3 \cdot 10^{-5}$ и $3 \cdot 10^7$. Эти значения несколько больше, чем найденные для высот в 10 км и 25 км, но последние столь близки между собой и достаточно мало отличаются от нижней оценки для высоты 80 км, что их можно рассматривать как довод в пользу представления, согласно которому распределение пыли в стратосфере определяется процессами интенсивного перемешивания воздушных масс, но не действием внешнего метеоритного источника.

Существование процессов перемешивания в нижней стратосфере, где воздух статически очень устойчив, и даже в верхней стратосфере, где воздух устойчив относительно сухой адиабаты и конденсация невозможна, согласуется с однородностью состава атмосферы на различных высотах, но связано с трудностями при попытках их объяснения, исходя из обычной термодинамической аргументации. Однако Ракипова⁵⁶ указала, что за возникновение восходящих потоков могут быть ответственны пылевые облака, захватывающие солнечную радиацию в количествах, достаточных для заметного нагревания воздуха. Воздух, содержащий пылевое облако, должен, таким образом, всплывать среди окружающих более чистых воздушных масс. Неся с собой содержащуюся в нем пыль, он может оставаться теплее, чем окружение, и сохранять всплывную силу. При этих условиях вертикальные движения возможны в статически стабильной,

даже изотермической атмосфере. Ракипова рассчитала концентрацию пылевых частиц, необходимую для создания заметного эффекта, и нашла, что в случае частиц с радиусом 10^{-5} см необходима концентрация 1 см^{-3} на высоте 80 км и около 10 см^{-3} на высоте 30 км. Эти оценки могут быть получены следующим путем. На высоте 80 км, например, где плотность воздуха равна $3 \cdot 10^{-8}$ г/см, солнечная энергия захватывается частицами (в предположении, что они имеют малое альbedo) в количестве примерно $N\pi r^2 \frac{\text{калорий}}{\text{см}^2}$ в минуту (где N —концентрация частиц с радиусом r), т. е. около $200 N\pi r^2 \frac{\text{калорий}}{\text{см}^2}$ в час. Если эта энергия передается окружающему

воздуху, ее достаточно, чтобы нагреть его на $10^3 \frac{Nr^2}{\rho}$ °С в час, или около $2 \cdot 10^{10} Nr^2$ °С в час на высоте 80 км. Таким образом, если $r=10^{-5}$ см и $N=1 \text{ см}^{-3}$, то нагревание становится заметным и составляет примерно 2° С в час. При температурном градиенте 6° С/км это соответствует вертикальному перемещению на 1 км за 3 часа или скорости $\frac{1}{3}$ м/сек. Очевидно для того, чтобы этот процесс играл существенную роль, концентрация пылевых частиц должна по крайней мере на два порядка превышать величину, полученную для серебристых облаков (10^{-2} см^{-3} для $r=10^{-5}$ см). Поскольку сомнительно, чтобы метеоритный материал проникал в атмосферу в виде однородного потока, столь высокие концентрации могут временами осуществляться в виде облаков, которые при благоприятном солнечном освещении будут подниматься на несколько километров, пока не достигнут 80-километрового уровня. Над основанием инверсионного слоя скорость всплывания существенно уменьшается, что приведет к приостановке дальнейшего подъема частиц пылевого облака, ибо всплывание содержащей их воздушной массы будет компенсироваться процессами осаждения, скорость которого составляет несколько сантиметров в секунду.

Частицы, проникающие в результате оседания из стратосферы в тропосферу, присоединяются к ядрам конденсации, поднятым в атмосферу с земной поверхности, и включаются в процесс выпадения осадков. Цитированные выше наблюдательные данные указывают, что в верхней тропосфере, где полная концентрация ядер конденсации близка к 10 см^{-3} , количество твердых частиц метеоритного происхождения нередко может превосходить количество ядер конденсации, поднятых с земной поверхности. В нижней тропосфере, где их концентрация не может быть много большей, частицы метеоритного происхождения составляют только ничтожную долю ядер конденсации, хотя, если принять во внимание их силикатную компоненту, они могут играть важную роль среди ядер оледенения в сравнительно обеспыленных воздушных массах (с другой стороны, Шеффер⁴⁵ нашел, что частицы магнитной пыли, собранные на открытом воздухе, и частицы дыма от возгоревшихся металлических метеоритов обычно не эффективны как ядра оледенения).

12. ОБРАЗОВАНИЕ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Некоторые из произведенных в Швеции наблюдений, особенно относящиеся к случаям, когда серебристые облака появились после полудня, убедительно свидетельствуют, что серебристые облака образуются в течение нескольких минут в области неба, которая до того не содержала никаких заметных образований, хотя и находилась в условиях, благоприятных для обнаружения. Гришин⁷ отмечает, что перед появлением отчетливо очерченных облаков часто может быть обнаружена безструктурная «вуаль». Это дает основание полагать, что появление облаков в поле зрения не обязательно обусловлено простым перемещением уже существую-

щих облаков из одного места в другое, но может быть следствием изменения условий их видимости.

Наиболее простая интерпретация образования в ограниченной области облаков, имеющих отчетливо выраженные детали, сводится к процессу конденсации, происходящему в воздухе, остывающем вследствие всплытия или по другим причинам. Мы уже обсуждали трудности, связанные с таким объяснением. Напомним, что конденсация может происходить только, если воздух много влажнее или много холоднее, чем этого можно ожидать, и что даже если бы удалось объяснить яркость облаков процессами конденсации, то такое объяснение оставалось бы не полным, ибо необходимо было бы еще выяснить происхождение соответствующего количества ядер конденсации. Если, кроме того, облака становились бы видимыми в результате роста образующих их частиц, то следовало бы ожидать, что вновь возникающие детали имели бы отчетливо голубой цвет и испытывали бы постепенное побеление. Подобное изменение цвета было отмечено только однажды ⁶ и не может рассматриваться как характерное явление. В равной мере неправдоподобной представляется визуализация облаков в результате конденсации водяных паров (не достигших точки насыщения) на гигроскопических ядрах.

Если процессы конденсации воды не играют существенной роли в образовании облаков, то последние следует рассматривать как пылевые образования и необходимо выяснить, каким образом пыль, по-видимому, присутствующая во всех слоях стратосферы, может перераспределиться и образовать четко ограниченные облака, наблюдаемые всегда на одной и той же высоте—около 80 км. Представляется правдоподобным, что основным здесь является образование слоя дымки на инверсионном уровне.

Подобные слои дымки представляют собой весьма заурядное в тропосфере явление и обычно связаны с температурными инверсиями. В слое с большим температурным градиентом, находящимся под инверсией, частицы пыли или иные ядра конденсации увлекаются потоками восходящего воздуха вверх от своих источников, расположенных вблизи земной поверхности. Но выше основания инверсии восходящие движения подавляются вследствие увеличения статической стабильности атмосферы, и концентрация частиц внезапно уменьшается на множитель порядка 10 или 100. Более того, под инверсией относительная влажность растет с высотой, так что размеры частиц (в большей мере гигроскопичных) достигают максимума в слое дымки. Тотчас над ней воздух обычно очень сух и рост частиц вследствие конденсации становится неощутимым. Таким образом, присутствие и высотное распределение паров воды играет весьма существенную роль в образовании резкой верхней границы слоя дымки.

Когда волновое движение возмущает слой, скопления пыли становятся видимыми для находящегося внизу наблюдателя, если последний смотрит под малым углом возвышения, ибо соседствующие линии зрения пронизывают слой в местах, имеющих существенно различные оптические толщи (рис. 15). На фоне сумеречного неба тогда выступают темные валы дымки или, если слой дымки благоприятно освещен, то светлые валы выделяются на фоне темного неба. Такая картина характерна для пылевых облаков в нижней стратосфере, невидимых в зенитной области неба и становящихся заметными вблизи горизонта.

Весьма вероятно, что подобным же образом, т. е. в результате возмущения пылевого слоя на уровне 80-километровой инверсии, возникают и детали серебристых облаков. Не было бы удивительным, если бы все резко очерченные облака, естественно становящиеся объектами измерений, оказались бы непосредственно связанными со слоем дымки и если

бы помимо них существовали и другие, доныне не обнаруженные еще облака, располагающиеся на меньших высотах и имеющие более размытые края.

Области «тени», наблюдаемые порой на границах наиболее плотных облачных образований (см. рис. 1), почти наверное представляют собой иррегулярности слоя дымки, ибо оптическая толщина облаков слишком мала, чтобы они могли бросать настоящую тень.

Образование слоя дымки на высоте 80 километров может быть следствием поднятия пылевых облаков из нижележащих слоев. Векслер¹⁸ рассмотрел наблюдательные данные о существовании очень больших, даже сверхадиабатических градиентов в интервале высот от 55 до 80 км. Они возникают в дневное время в результате нагревания озонного слоя солнечной радиацией; хотя озон концентрируется на меньших высотах, суточные вариации температуры имеют максимум на высоте около 50 км⁵⁷. Это может служить причиной того, что серебристые облака наблюдаются только в тот сезон и на тех широтах, где имеет место достаточно продолжительное прогревание озонного слоя: близ летнего солнцестояния на больших широтах Солнце не заходит для вершины озонного слоя за горизонт. В этот сезон, поэтому, конвективные движения должны быть особенно развиты, и мы можем предполагать, что восходящие потоки возникают преимущественно в пылевых облаках. Соответственно под 80-километровой инверсией, где запыленный воздух теряет свою подъемную силу и растекается горизонтально, концентрация пыли будет возрастать. Если пыль проникает в стратосферу снизу в виде эруптивного облака, то сразу же образуется сформированный слой дымки. Если же пыль попадает в стратосферу извне, из межпланетного пространства, в результате конденсации продуктов разрушения метеоритов, то произвести оценку изменения концентрации при переходе через 80-километровую инверсию не представляется возможным без данных о накоплении пыли в конвективном слое и о высотах, на которых происходит конденсация. Яркие метеоры, образованные частицами с массой в несколько граммов и врывающиеся в атмосферу со скоростью около 40 км/сек, впервые становятся видимыми на высотах около 100 км и исчезают примерно на 70 км высоты. Частицы большего размера способны проникать до меньших высот, и таким образом значительная доля продуктов их разрушения должна конденсироваться ниже 80-километрового уровня. Это обстоятельство должно было бы способствовать образованию хорошо ограниченного слоя дымки. Однако, с другой стороны, произведенные Уипплом⁵⁸ оценки, относящиеся к испарению попадающих в атмосферу частиц малых размеров, входивших ранее в состав межпланетных облаков и ответственных за зодиакальный свет, указывают, что эти частицы должны полностью испаряться, далеко не достигнув 80-километрового уровня. Поэтому кажется правдоподобным, что только метеорологические процессы могут принимать существенное участие в формировании слоя дымки или заметной концентрации малых пылевых частиц вблизи 80-километрового уровня. Примечательно, что пылевые облака, которые при солнечном освещении могут быть причиной ощутимого нагревания воздуха, могут в равной мере быть ответственными и за его заметное охлаждение, когда они находятся в области земной тени. Поскольку длинноволновое излучение, испускаемое Землей и ее атмосфе-

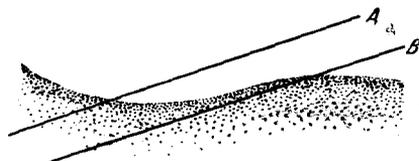


Рис. 15. Слой дымки с резко очерченной и возмущенной верхней границей становится частично видимым при визировании под малым углом вследствие различия оптической толщины вдоль линий зрения А и В.

рой, соответствует температуре черного тела около 245° абс, частицы, находящиеся в верхних слоях атмосферы (т. е. излучающие во всех направлениях, а получающие излучение только из нижней полусферы), будут находиться в радиационном равновесии при температуре $245 \cdot 2^{-1/4} = 206^{\circ}$ абс. Температура в верхней атмосфере, по крайней мере в интервале нескольких километров около 80-километровой инверсии, превосходит это значение, так что пылевые облака могут играть роль охлаждающего агента и способствовать возникновению нисходящих токов. Предположительно, во время высокоширотного лета, когда тень Земли перемещается преимущественно по широте, может возникнуть тенденция к циркуляции в окрестности тени в слое от 50 до 80 км высоты. Эта циркуляция могла бы создаваться преимущественно восходящими потоками внутри пояса шириною несколько сот километров в освещенной Солнцем области и преимущественно нисходящими потоками внутри аналогичного пояса, расположенного в области земной тени. Такая циркуляция должна была бы создать на 80-километровом уровне компоненту скорости по направлению от освещенной Солнцем области к области тени, как это, по-видимому, наблюдается при движении серебристых облаков.

13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кажется весьма сомнительным, чтобы конденсация водяного пара играла какую-нибудь роль в образовании серебристых облаков. Последние, вероятно, образуются из твердых частиц малого размера, могущих проникать в стратосферу снизу во время мощных вулканических извержений или же образовываться в стратосфере путем конденсации газов в метеорных следах. В продолжении высокоширотного лета в верхней атмосфере в результате продолжительного нагревания озонного слоя должен создаваться большой температурный градиент. Конвективные движения, возможно поддерживаемые нагреванием пылевых облаков прямыми лучами Солнца, перераспределяют пылевые частицы в слое, простирающемся вплоть до 80-километровой температурной инверсии. Иррегулярные и волновые возмущения, происходящие в верхней части пылевого слоя, делают эти пылевые облака видимыми. Облака могут появляться преимущественно в области близ границы земной тени около полуночи, когда соответствующий пояс атмосферы остается в течение нескольких часов по другую сторону границы тени так, что в верхней атмосфере устанавливается циркуляция, при которой освещенный Солнцем воздух поднимается, а воздух, находящийся внутри земной тени, опускается. Эта циркуляция и слой дымки на высоте 80 километров, создающие условия для появления видимых облаков, не могут развиваться на других широтах и в другие сезоны вследствие отсутствия больших температурных градиентов и вследствие быстроты перемещения земной тени относительно атмосферы. Присущая серебристым облакам тенденция появляться чаще после, чем до полуночи, может быть связана с суточными вариациями в захвате межпланетных частиц, но эта и некоторые другие особенности серебристых облаков нуждаются в специальном исследовании. Серебристые облака могут представлять интерес для астрономов как свидетельство захвата Землей межпланетного вещества и весьма важны для метеорологов как индикатор атмосферных процессов, распространяющихся на стратосферу, а также как напоминание, что заметная доля ядер конденсации и обледенения в верхней части тропосферы может поставляться из межпланетного пространства.

Проводя в будущем наблюдения серебристых облаков, важно регистрировать случаи, когда они отсутствуют, несмотря на благоприятные

условия видимости. Было бы очень желательно создать сеть наблюдательных станций с тем, чтобы выяснить истинные границы области существования серебристых облаков и вопрос о том—одновременно ли они появляются в различных частях земного шара, или нет. Исключительная красота этого редкого явления, особенно когда оно ярко выражено, послужит вознаграждением за длительные часы напряженного, но порою бесплодного ожидания.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A r a g o F., Complete works. 4, 73, 1854.
2. S c u l t e t u s H. R., Ältere Beobachtungen von Leuchtstreifen. Zeits. f. Met. 3, 272 (1949).
3. V e s t i n e E. H., Noctilucent clouds. J. Roy. Astr. Soc. Canada, 249, 1934.
4. S t o r m e r C., Height and velocity of luminous night clouds observed in Norway, 1933; Publ. 6, Univ. Obs., Oslo (1932).
5. S t o r m e r C., Measurements of luminous night clouds in Norway, 1933 and 1934. Astrophys. Norvegica I, № 3, 1935.
6. P a t o n J., Direct evidence of vertical motion at about 80 km provided by photographs of noctilucent clouds, 31, Proc. Toronto Met. Conf., Roy. Met. Soc., London, 1954.
7. Г р и ш и н Н. И., О структуре серебристых облаков, Мет. и гидрол. № 1, 23 (1955).
8. Х в о с т и к о в И. А., Серебристые облака, Природа 5, 49 (1952).
9. W h i p p l e F. J., On phenomena related to the great Siberian meteorite. Ibid. 60, 505 (1934).
10. P a t o n J., Simultaneous occurrence of aurora and noctilucent clouds. Ibid. 80, 145 (1951).
11. S p a n g e n b e r g W. W., Über die leuchtenden Nachtwolken, 1932—41. Wetter und Klima 2, 15 (1949).
12. J e s s e O., Die Höhe der Leuchtenden Nachtwolken. Astr. Nachr. 140, 161 (1896).
13. P a t o n J., Luminous night clouds. Met. Mag. 78, 354 (1949).
14. A r c h e n h o l d F. S., Die leuchtenden Nachtwolken..., Das Weltall. 27, Jahrgang, 1928.
15. M u r g a t r o y d R. J., G o l d s m i t h P. and H o l l i n g s W. E. H., Some recent measurements of humidity from aircraft up to heights of about 50,000 ft over southern England. Quart. J. R. Met. Soc. 81, 533 (1955).
16. W h i p p l e F. L., Results of rocket and meteor research, Bull. Amer. Met. Soc. 33 13 (1952).
17. O. M. I., Definitions and specifications of water vapour in the atmosphere, Publ. 79, Lausanne (1955).
18. W e x l e r H., Annual and diurnal temperature variations in the upper atmosphere. Tellus 2, 262 (1950).
19. J a c o b s L., Dust cloud in the stratosphere. Met. Mag. 83, 115 (1954).
20. B u l l G. A. and J a m e s D. G., Dust in the stratosphere over western Britain on April 3 and 4, 1956; Met. Mag. 85, 293 (1956).
21. W h i p p l e F. J. W., The great Siberian meteorite and the waves, seismic and aerial, which it produced. Quart. J. R. Met. Soc. 56, 287 (1930).
22. Ф е с е н к о в В. Г., Масса атмосферных остатков Сихоте-Алинского метеорита, ДАН 66 (1949).
23. B o w e n E. G., The influence of meteoritic dust on rainfall. Austral. J. Phys. 6, 490 (1953).
24. L o v e l l A. C. B. and C l e g g J. A., Radio Astronomy, Chapman and Hall, London, 1952.
25. W h i p p l e F. L. and H a w k i n s G. S., On meteors and rainfall. J. Met. 13, 236 (1956).
26. L o v e l l A. C. B., Meteor Astronomy, Clarendon Press, Oxford 1954.
27. W h i p p l e F. L., The theory of micrometeorites, I, Proc. Nat. Acad. Sci., Wash. 36, 687 (1950).
28. W h i p p l e F. L., The theory of micrometeorites, II, Ibid. 37, 19 (1951).
29. J a c c h i a L. G., Physical theory of meteors. A. J. 121, 521 (1955).
30. L i n k F., Couche de poussières météoriques dans une atmosphère planétaire. Bull. Astr. Inst. Czecho 2, 1 (1950).
31. K n u d s e n M., The Kinetic Theory of Gases. Methuen, London (1934).
32. M i n n a e r t M., Light and colour in the open air, G. Bell. London (1940).

33. Van de Hulst H. C., Zodiacal light in the solar corona. *Ap. J.* **105**, 471, 1947.
34. Rense W. A., Jackson J. M. and Todd B., Measurements of the inner zodiacal light during the total solar eclipse... *J. Geophys. Res.* **58**, 369 (1953.)
35. Allen C. W., The spectrum of the corona at the eclipse of 1940. *Mon. Not. R.A.S.* **106**, 137 (1946).
36. Blackwell D. E., A comparison of the intensities of infra-red and violet radiation from the solar corona... *Mon. Not. R.A.S.* **112**, 652 (1952).
37. Whipple F. L., A comet model. III. The Zodiacal light. *Ap. J.* **121**, 750 (1955).
38. Wyatt S. P. and Whipple F. L., The Pointing-Robertson effect on meteor orbits. *Ap. J.* **III**, 134 (1950).
39. Piotrowski S. L., The collisions of asteroids, *A. J.* **57**, 23, 1952.
40. Whipple F. L., Photographic meteor orbits and their distribution in space, *A. J.* **59**, 201 (1954).
41. Öpik E. J., Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter. *Proc. Roy. Irish Acad., A* **54**, 165 (1951).
42. Pettersson H. and Rotschi H., Nickel content of deep-sea deposits, *Nature* **166**, 308 (1950).
43. Öpik E. J., Cosmic sources of deep-sea deposits, *Nature* **176**, 926 (1955).
44. Thomsen J. W., The annual deposit of meteoritic dust. *Sky and Telescope* **12**, 147 (1953).
45. Schaefer V. J., The question of meteoric dust in the atmosphere, unpublished, 1955.
46. Bouska J. and Svestka Z., On the variation of the enlargement of the earth's shadow during lunar eclipses, *Bull. Astr. Inst. Czecho.* **2**, 6 (1950).
47. Zacharov I., Influence des Perséides sur la transparence atmosphérique. *Bull. Astr. Inst. Czecho.* **3**, 82 (1952).
48. Калитин Н. Н., Космическая пыль по актинометрическим измерениям, *ДАН* **45**, 375 (1944).
49. Link F., Contribution of meteoritic material to atmospheric absorption, «*Meteors*», *Special Suppt. J. Atm. Terr. Phys.* **2**, 36 (1955).
50. Gruner P. and Kleinert H., *Die Dämmerungserscheinungen, Probleme der Kosmischen Physik, Henri-Grand, Hamburg* (1927).
51. Packer D. M. and Lock C., The brightness and polarisation of the daylight sky at altitudes of 18,000 to 38,000 ft. *J. Opt. Soc. Amer.* **41**, 473 (1951).
52. Bigg E. K., The detection of atmospheric dust and temperature inversions by twilight scattering, *J. Met.* **13**, 262 (1956).
53. Penndorf R., The vertical distribution of Mie particles in the troposphere. *Geophys. Res. Paper 25, G.R.D., Cambridge, U.S.A., 1954.*
54. Ludlam F. H., The forms of ice clouds, II, *Quart. J. R. Met. Soc.* **82**, 257, 1956.
55. Stormer C., Mother-of-pearl clouds. *Weather* **3**, 13 (1948).
56. Ракипова Л. П., Возможное влияние пыли на вертикальные перемещения и на изотермию в стратосфере. *Изв. АН СССР, сер. геофиз.* **II**, 15 (1947).
57. Johnson F. S., High-altitude diurnal temperature changes due to ozone absorption. *Bull. Amer. Met. Soc.* **34**, 106 (1953).
58. Whipple F. L., Meteors and the earth's upper atmosphere. *Rev. Mod. Phys.* **15**, 246 (1943).