

К объяснению феномена пространственно-временной модуляции интенсивности световых столбов от наземных источников света

Бруно Валентинович Кауль¹, Игнатий Викторович Самохвалов²

¹ *Институт оптики атмосферы СО РАН, лаборатория лидарных систем
634055, г. Томск, пл. акад. Зюева, 1
kaul@iao.ru*

² *Томский государственный университет, радиофизический факультет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
ignat@sibmail.com*

Поступила в редакцию 16.08.2007 г.

Наблюдавшееся в высоких широтах явление пространственной и временной модуляции интенсивности световых столбов, происходившей синхронно с возмущениями магнитного поля Земли и сполохами полярного сияния, связывается с влиянием на ориентацию ледяных частиц электромагнитных волн радиодиапазона, генерируемых в ионосфере.

Ключевые слова: электромагнитное поле, ледяные частицы, ориентация, гало.

В статье [1] описано явление, имеющее вид периодически модулированного по яркости светового столба от наземного источника света, но этот феномен не получил удовлетворительного объяснения. Данная статья, как надеются авторы, восполнит этот пробел.

Световые столбы можно часто наблюдать в морозные зимние ночи. Причина их возникновения — отражение света от кристаллических частиц льда, ориентация плоских граней которых близка к горизонтальной. В том же кроется причина возникновения солнечных столбов. Описанию этих явлений посвящено довольно много работ [2–4]. Не исключена возможность модуляции яркости по протяженности столба, связанная с вертикальной стратификацией ледяного аэрозоля. Но в таком случае модуляция имеет вид достаточно размытой случайной функции, что характерно для аэрозольных слоев.

Особенностью феномена, описанного в [1], явилось то, что световой столб имеет четко выраженную периодическую структуру в виде чередования светлых и темных штрихов (рис. 1) [1, рис. 2]. Их угловые размеры увеличиваются с высотой. Количество светлых пятен, вставившихся в кадр, можно примерно оценить числом 40. Точное значение определить невозможно, так как вблизи источника света они сливаются в одну линию.

Особенности подобных явлений состоят в том, что они наблюдались в г. Норильске (примерно 70° с.ш.) и никогда не наблюдались в Якутске (61° с.ш.); во время наблюдений имели место возмущения магнитного поля Земли, которые сопровождались явлением Полярного сияния; изменения



Рис. 1. Стратифицированное гало. Фото Л.Н. Попова

яркости светового столба происходили синхронно со сполохами Полярного сияния и носили разнообразный характер, а именно: наблюдалось либо

изменение яркости всего столба, либо отдельной его части, либо отмечался, по терминологии авторов, «режим бегущих страт». Именно последний случай зафиксирован на приведенной в [1] фотографии (см. рис. 1).

Анализируя совокупность всех перечисленных факторов, мы предположили, что периодическая модуляция яркости светового столба обусловлена интерференцией падающих и отраженных электромагнитных волн. Подстилающая поверхность представляет собой мерзлый грунт, покрытый слоем снега, т.е. неоднородный вдоль волнового вектора диэлектрик с потерями. Поэтому фазовые сдвиги при отражении могут зависеть от частоты, так что создаются условия для образования волновых пакетов в разные моменты и в различных интервалах пространства. Это и создает эффект «бегущих страт».

Для оценки этого явления предположим, что падающая электромагнитная волна — монохроматическая, и при ее отражении от земной поверхности могут образоваться стоячие волны. В пучностях электрического вектора происходит ориентация ледяных кристаллов большими диаметрами в горизонтальное положение (вдоль вектора \mathbf{E} падающей волны). Частоты генерируемых волн в разные моменты времени могут существенно различаться, так что длина полуволны может охватывать видимую протяженность всего столба либо его части, либо на видимую протяженность столба укладывается много полуволн. Тогда при неизменной частоте должна образоваться система эквидистантных слоев ориентированных частиц. Их отражательная способность выше, чем у частиц, находящихся в узлах стоячих волн.

Представленная в [1] фотография позволяет приблизительно оценить среднюю длину полуволны и тем самым оценить диапазон частот электромагнитных колебаний. Отображенной ситуации соответствует частота порядка 70–90 МГц. Чтобы длина полуволны охватывала всю видимую часть столба, частота должна быть порядка нескольких МГц. На указанных частотах относительная диэлектрическая проницаемость льда равна 4,7. Соответственно коэффициент отражения для амплитуд R при нормальном падении равен 0,37. Эту величину принимаем за коэффициент отражения мерзлого грунта, покрытого снежным покровом.

Напряженность поля, представленного суперпозицией падающей $E_0 \sin(\omega t - kh)$ и отраженной $RE_0 \sin(\omega t + kh + \delta)$ плоских волн, можно представить в следующем виде:

$$E(h,t) = (1 - R)E_0 \sin(\omega t - kh) + 2RE_0 \cos\left(kh + \frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\delta}{2}\right), \quad (1)$$

где E_0 — амплитуда падающей волны; k — волновой вектор, коллинеарный вертикальному направлению h ; δ — сдвиг фазы при отражении.

Второй член в правой части выражения (1) представляет собой стоячую волну. Амплитуда ко-

лебаний в ее пучностях равна удвоенной амплитуде отраженной волны, а в узлах — нулю. Но вследствие того что $R \neq 1$, в местах положения узлов стоячей волны амплитуда колебаний равна не нулю, а $0,63E_0$. В пучностях она составляет $1,37E_0$.

В качестве первого предположения принимаем, что ориентация частиц полем электромагнитной волны происходит как следствие взаимодействия с наведенным в частице этой же волной дипольным моментом. Условием возникновения ориентирующего момента сил является тензорный характер поляризуемости, который в ледяных частицах имеет место из-за несферичности. Подробно этот вопрос изложен в [5]. Отметим, что в [5] рассматривался вопрос ориентации в электростатическом поле, но принципиального значения это не имеет. Особенностью ориентации электромагнитной волной является необходимость усреднения по периоду волны [6]. Учет фазового сдвига между напряженностью поля и дипольным моментом происходит автоматически, так как отличие диэлектрической проницаемости для волн указанных частот от ее значения для статического поля как раз является следствием запаздывания поляризации.

При оценке совместного ориентирующего действия аэродинамического и электромагнитного факторов следует иметь в виду погодные условия формирования световых столбов. Обычные условия их наблюдения — это морозная безветренная погода, при которой происходит «вымерзание» воды из воздушных масс в предшествовавший относительно теплый и влажный период. Кристаллизация происходит в приземном слое непосредственно из пара при невысокой абсолютной влажности зимнего воздуха. По этой причине кристаллы не успевают вырасти до крупных размеров. Для оценки нами взяты большие диаметры (30 мкм) как для пластинок, так и для столбиков при отношении $d_{\max}/d_{\min} = 3$. Морозная безветренная погода обычно сопровождается температурной инверсией и подавленной турбулентностью, поэтому скорость диссипации энергии взята равной $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^3$.

Численные оценки, выполненные на основе работы [5], побуждают отвергнуть изложенную выше модель. Дело в том, что действие электрического момента сил становится сопоставимым с действием аэродинамического момента при $E_0 = 10^4 \text{ В/м}$. Невозможно представить себе генерацию волны с такой амплитудой. Вектор Пойнтинга при этом составил бы величину порядка 10^5 Вт/м^2 . Волны с меньшей амплитудой не оказывают заметного влияния на фоне аэродинамической ориентации. Причина кроется в малости дипольного момента, наводимого полем. К примеру, в столбике длиной 30 и диаметром 10 мкм поле напряженностью 1 В/м создает дипольный момент $1,2 \cdot 10^{-24} \text{ К} \cdot \text{м}$. Численно этой же величине будет равен максимальный механический момент, в то время как аэродинамический момент сил составляет примерно $10^{-17} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$.

Оставаясь на позиции, что феномен обусловлен электромагнитным воздействием на кристаллы

льда со стороны системы стоячих волн, принимаем следующую модель.

Допустим в качестве рабочей гипотезы, что частицы имеют постоянный дипольный момент \mathbf{p} . Можно представить себе следующий механизм его образования. Если в процессе роста кристалла в какой-то момент захвачен, например, положительный аэрон, то поверхность, нарощая в последующие моменты времени, будет иметь также положительный поляризационный заряд. Это благоприятствует захвату на эту поверхность свободного отрицательного заряда. При дальнейшем росте кристалла поляризационный заряд поверхности примет отрицательное значение и захватит положительный свободный заряд. Повторение процесса образует цепочку чередующихся по знаку зарядов, которая будет обладать значительным дипольным моментом.

Наличие в столбике длиной 30 мкм даже одной лишней пары элементарных зарядов создаст дипольный момент порядка $4,8 \cdot 10^{-24}$ К·м, в то время, как отмечено выше, наведенный дипольный момент равен $1,2 \cdot 10^{-24}$ К·м.

В поле электромагнитной волны на частицу будет действовать знакопеременный момент сил

$$\mathbf{M} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}_0 e^{i\omega t}. \quad (2)$$

Для оценки результата действия аэродинамического и электрического моментов сил запишем уравнение движения для частицы, дипольный момент которой расположен в плоскости, содержащей вертикаль и направление колебаний вектора \mathbf{E}_0 :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \zeta \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \lambda \rho u^2 V \sin 2\theta = -p E_0 \sin \theta \cos(\omega t + \delta), \quad (3)$$

где I – момент инерции частицы; ζ – коэффициент вязкого трения, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; λ – формфактор; ρ – плотность воздуха; u – скорость падения частицы; V – объем частицы; p – модуль дипольного момента. Третий член в левой части представляет собой аэродинамический момент сил [7]. Здесь угол θ отсчитывается от горизонтального направления, совпадающего с направлением вектора \mathbf{E}_0 .

Уравнение (3) с нулевой правой частью описывает движение частицы при отсутствии поля и возмущений со стороны броуновского движения и турбулентности. В то же время это уравнение описывает движение маятника с затуханием. Вследствие упомянутых возмущений частица выходит из положения равновесия, поэтому правая часть в (3) становится отличной от нуля. Уравнение требует численного решения, но для сохранения физической наглядности рассмотрим упрощенный вариант.

Допустим, что отклонения от положения равновесия не слишком велики, так что $\sin \theta \approx \theta$, и преобразуем (3) к следующему виду:

$$\frac{d^2}{dt^2} \theta(t) + 2a \frac{d}{dt} \theta(t) + [\Omega_0^2 + \Omega^2 \cos(\omega t + \delta)] \theta(t) = 0, \quad (4)$$

где $a = \zeta / 2I$; $\Omega_0 = \sqrt{\lambda \rho u^2 V / I}$; $\Omega = \sqrt{p E_0 / I}$.

Обозначим периодическую функцию, стоящую в квадратных скобках, как $\psi(t)$. Она изменяется в пределах

$$(\Omega_0^2 - \Omega^2) \leq \psi(t) \leq (\Omega_0^2 + \Omega^2).$$

Согласно [8, 9] будут выполняться следующие условия:

1) если $a^2 \geq (\Omega_0^2 + \Omega^2)$, то каждое решение при $t \rightarrow \infty$ стремится к нулю; (5а)

2) тот же результат будет, если $a^2 < (\Omega_0^2 + \Omega^2)$ и выполняется условие

$$\int_0^{1/f} \psi(t) dt \leq 4a \text{cth}(a/f), \quad (5б)$$

где $f = \omega / 2\pi$ – циклическая частота.

Вышеизложенное имеет достаточно прозрачный физический смысл. Большие значения коэффициента a означают преобладание сил вязкого трения, при котором движение носит аperiодический характер. Несмотря на то что момент сил от действия электромагнитной волны имеет знакопеременный характер, средний суммарный ориентирующий момент сил оказывается выше, чем в отсутствие волны.

При жестком нарушении условия (5б), т.е. при достаточно низкой частоте и большой амплитуде электромагнитной волны, возможен колебательный режим с малым декрементом затухания, когда частица по инерции проходит через положение $\theta = 0$, где действующий момент сил равен нулю.

Оценку выполним для столбиков длиной 30 и диаметром 10 мкм. В расчетах принято, что динамическая вязкость воздуха равна $3 \cdot 10^{-5}$ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Формулы для расчета момента инерции и коэффициента вязкого трения при вращении вытянутого эллипсоида вокруг короткой оси имеются в [5].

Расчет дает значения: $a^2 = 4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-2}$, $\Omega_0^2 = 1,28 \cdot 10^3 \text{ с}^{-2}$. Электромагнитная волна будет оказывать заметное воздействие на ориентацию частиц, когда Ω сопоставима с Ω_0 . При амплитуде электромагнитной волны 1В/м равенство $\Omega = \Omega_0$ выполнится, если дипольный момент равен $2,4 \cdot 10^{-17}$ К·м. Последнее предполагает наличие на частице пары противоположных зарядов $8 \cdot 10^{-13}$ К. Согласно литературным данным [10], такие заряды вполне реальны. При обозначенной амплитуде волны плотность мощности составит $2,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/м². Уместно отметить, что такая плотность мощности примерно на порядок превосходит величину электромагнитного фона в полосе частот 11,5–12,5 МГц по результатам измерений в обычных (в отсутствие полярных сияний) условиях [11].

Величина a^2 , характеризующая вязкое трение, в данном случае на порядок превосходит $(\Omega_0^2 + \Omega^2)$, что соответствует аperiодическому движению к по-

ложению равновесия ($\theta = 0$). Нарушение условия (5a) наступает, если допустить, что дипольный момент на два порядка больше. Но условие (5б) при этом выполняется. Оно может нарушиться, если заряды на частице будут порядка 10^{-8} К, что практически невозможно. Если размеры частицы увеличить в 10 раз, то при заряде частицы $8 \cdot 10^{-13}$ К и амплитуде волны 1 В/м возможны колебания на частотах $f \leq 40$ Гц.

Из сказанного следует, что возможны два типа воздействия электромагнитных волн на интенсивность световых столбов.

1. Допустим, что размеры частиц достаточно велики — примерно 300 мкм и более. Тогда вследствие их аэродинамического ориентирования создаются условия для формирования светового столба. Под воздействием волн с частотами 10–100 Гц частицы начинают колебаться, что частично или полностью разрушает условия образования светового столба. Очевидно, что подобная модуляция интенсивности будет относиться ко всей протяженности столба. Здесь не может быть речи об эффекте, создаваемом стоячими волнами, так как длины волн составляют сотни километров.

2. Размеры частиц малы — порядка нескольких десятков микрон, так что их аэродинамическое ориентирование не создает условий, благоприятных для образования яркого светового столба. В результате интерференции падающей и отраженной высокочастотных электромагнитных волн образуются области с повышенной амплитудой, перемещающиеся в пространстве и создающие эффект «бегущих страт». Увеличение угловых размеров светлых штрихов с высотой (см. рис. 1) [1] может быть объяснено, если допустить, что происходила девиация в сторону больших частот.

Влияние электромагнитного излучения на ориентацию оценим на основе распределения [5, 7]:

$$f(\theta) = \exp[\xi \cos 2\theta] / \pi I_0(\xi). \quad (6)$$

Здесь I_0 — модифицированная функция Бесселя первого рода и нулевого порядка. Параметр распределения ξ в данном случае имеет следующий вид:

$$\xi(l, \varepsilon) = [\lambda \rho v^2 (l) V + p E_0] / 2 \rho l^3 \sqrt{v \varepsilon}, \quad (7)$$

где l — длина столбика; ε — скорость диссипации энергии; v — кинематическая вязкость воздуха.

На рис. 2 показан вид распределения осей вращения вытянутых эллипсоидов, имитирующих столбики, в отсутствие электромагнитной волны и при двух значениях амплитуд колебаний электрического вектора.

Амплитуды соотносятся между собой как значения в узлах и пучностях стоячей волны (1,37/0,63). В пучностях острота распределения существенно возрастает. Значительно большая доля частиц занимает положения, при которых большие плоские грани горизонтальны. К этому следует добавить, что при наличии преимущественной линей-

ной поляризации волны оси столбиков приобретают еще и азимутальную ориентацию. Это могло бы объяснить отклонение линии страт от вертикального направления, которое можно видеть на фотографии (см. рис. 1).

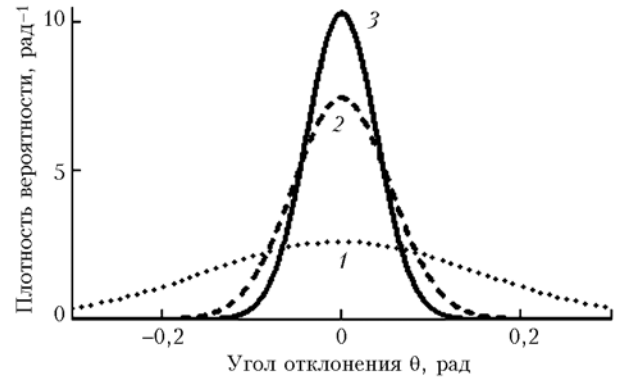


Рис. 2. Распределение осей вытянутых эллипсоидов вращения длиной 30 мкм и диаметром 10 мкм возле горизонтального положения при двух указанных значениях амплитуд электромагнитной волны и в ее отсутствие: 1 — $E = 0$; 2 — 0,63; 3 — 1,37 В/м

Заключение

Рассмотрены два варианта механизма воздействия электромагнитного излучения, возникающего при магнитных возмущениях в ионосфере, на ориентацию ледяных частиц.

Вариант воздействия через наведенный дипольный момент требует слишком большой мощности излучения. Вариант присутствия у частиц постоянного дипольного момента порядка 10^{-17} К·м допускает заметное воздействие на ориентацию частиц при плотности мощности излучения 10^{-3} Вт/м². Воздействие может носить двоякий характер. Низкочастотные колебания с частотой порядка 10–10² Гц могут разрушать сложившуюся за счет аэродинамических сил ориентацию достаточно крупных (порядка 300 мкм и более) частиц, приводя их в колебательное состояние. В этом случае возможно уменьшение яркости всего светового столба. В то же время колебания поля с указанными частотами и выше способствуют ориентации мелких частиц, поскольку аэродинамических сил оказывается недостаточно для формирования ориентации, при которой появляется яркий световой столб.

В зависимости от частоты может модулироваться либо яркость всего столба или его части, либо образуется квазипериодическая структура яркости вдоль столба. В последнем случае требуется выполнение достаточно жестких условий, а именно: присутствие на частицах большого избыточного заряда и достаточно большой интенсивности радиоволн в диапазоне 10–100 м и, кроме того, их падения на поверхность Земли, близкого к нормальному, что благоприятствует образованию волновых пакетов. Видимо по этой причине столь редкое явление наблюдалось только в высоких широтах.

В статье не ставилась задача дать описание конкретного явления, представленного в [1] во всей полноте имеющихся там деталей — для этого нет достаточных исходных данных. Изложенное в статье следует понимать как качественную иллюстрацию возможного физического механизма явления, которое до настоящего времени не получило какого-либо иного объяснения.

Тематика работы поддерживается грантами РФФИ № 07-05-00672, 06-05-89500 ННС и № 07-05-91102-АФГИР, а также Федеральным агентством по науке и инновациям, Гос. контракт № 02.518.11.7075.

1. Самохвалов И.В., Попов Л.Н. Особенности поведения гало искусственных источников света в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1639–1642.
2. Greenler R.G., Drinkwine M. The origin of sun pillars // Amer. J. Sci. 1972. V. 60. P. 292–302.
3. Sassen K. Polarization and Brewster angle properties of light pillars // J. Opt. Soc. Amer. 1987. V. 4. P. 570–580.

4. Mallmann J., Hock J.L., Greenler R.G. Comparison of Sun pillars with light pillars from nearby light sources // Appl. Opt. 1998. V. 37. N 9. P. 1441–1449.
5. Кауль Б.В. Влияние электрического поля на ориентацию частиц ледяных облаков // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 9. № 10. С. 835–840.
6. Кауль Б.В. Электрооптический эффект при воздействии линейно поляризованного излучения на частицу из анизотропного диэлектрика // Изв. вузов. Физ. 1983. № 11. С. 17–21.
7. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков *Si*: Ч. 1. Ориентация при падении // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 963–967.
8. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1976. 576 с.
9. Беллман Р. Теория устойчивости решений дифференциальных уравнений. М.: ИЛ, 1954. 210 с.
10. Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М. Электричество облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 91 с.
11. Ковалев А.А., Колесник С.А., Колмаков А.А. Закономерности изменения электромагнитного фона высокочастотного диапазона в Сибирском регионе // Тр. Междунар. Байкальской школы по фундаментальной физике. Иркутск, 2006. С. 125–127.

B.V. Kaul, I.V. Samokhvalov. To explanation of the phenomenon of spatial-temporal modulation of intensity of light columns from ground light sources.

The observed in high latitudes phenomenon of spatial and temporal modulation of intensity of light columns, proceeding simultaneously with Earth field perturbations and northern lights, is attributed to the influence of electromagnetic radio waves, generated in the atmosphere, on the ice particle orientation.