

ГЕОФИЗИКА

Г. В. РОЗЕНБЕРГ, И. А. ХВОСТИКОВ и Ф. Ф. ЮДАЛЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА  
НА ЯРКОСТЬ СУМЕРЕЧНОГО НЕБА***(Представлено академиком С. И. Вавиловым 5 I 1948)*

Сумеречный метод исследования высоких слоев атмосферы, положивший в свое время начало разработке и весьма успешному применению различных косвенных методов изучения стратосферы, является и теперь одним из наиболее эффективных. Быстрое изменение яркости неба при погружении Солнца под горизонт, обусловленное постепенным вхождением все более высоких атмосферных слоев в тень Земли, создает возможность послойного исследования атмосферы путем соответствующих фотометрических измерений. Изменение яркости неба приостанавливается только тогда, когда тень Земли достигает высоты (в зените) 250—300 км. Возможность исследования очень высоких слоев, указанная основателем метода акад. В. Г. Фесенковым еще в его ранней работе <sup>(1)</sup>, явилась причиной широкого применения сумеречного метода в СССР и за границей.

Теория метода очень сложна. В. Г. Фесенков более 20 лет тому назад дал теорию, учитывающую действие лишь первичного рассеяния. До сих пор нет строгой теории, учитывающей влияние многократного рассеяния. Вследствие сложности такой теории до последнего времени не удавалось пойти дальше общих, а подчас даже противоречивых суждений, не содержащих никаких количественных оценок.

Исключением явилась работа Хальбарта, который в 1938 г. вычислил долю яркости, определяемую вторичным рассеянием при разном погружении Солнца <sup>(2)</sup>. Выводы Хальбарта, если бы они были правильными, делали бы сумеречный метод почти бесполезным. По данным Хальбарта, доля вторичного рассеяния катастрофически быстро увеличивается по мере увеличения зенитного расстояния Солнца. Уже при высоте тени Земли 60 км доля вторичного рассеяния равна доле первичного, а на больших высотах вторичное рассеяние совершенно подавляет первичное. Это ограничивает применимость сумеречного метода высотой 50—60 км, поскольку лишь первичное рассеяние имеет отчетливое пространственно локализованное происхождение (в слое, прилегающем к тени Земли), чего вовсе нет для вторичного рассеяния, возникающего в других частях атмосферы и притом преимущественно в тропосфере при любых значениях высоты тени Земли. Работа Хальбарта могла приостановить развитие сумеречного метода.

Несколько лет тому назад одному из нас, при реферировании работы Хальбарта в Геофизическом институте АН СССР, пришлось указать на наличие в этой работе внутренних противоречий такого

рода, что из собственных данных Хальбарта видна неправильность его выводов. Было указано, что, вопреки Хальбарту, доля вторичного рассеяния никогда, повидимому, не достигает таких значений, которые не позволяли бы применять сумеречный метод для изучения даже наиболее высоких слоев атмосферы, скажем, до высоты 150—200 км. Начатая после того нами и нашими коллегами работа по построению теории сумеречного метода с учетом вторичного рассеяния теперь уже дает первые вполне определенные количественные результаты. В настоящей заметке мы коснемся некоторых принципиальных моментов, показывающих ошибочность выводов Хальбарта и поясняющих перспективы развития сумеречного метода.

Исследование Хальбарта основано на предложенной им остроумной комбинации эмпирических и теоретических данных. Он не дает теоретического решения задачи о вторичном рассеянии, но вычисляет вторичное рассеяние из величины яркости светлого сегмента неба у горизонта со стороны Солнца. Ввиду особых трудностей полного расчета вторичного рассеяния Хальбарт поступает так: первичное рассеяние он вычисляет обычным образом как рассеяние прямых солнечных лучей, но вторичное рассеяние он рассчитывает как первичное рассеяние света, идущего из указанного выше светлого сегмента неба. Изменение яркости этого последнего при различном положении Солнца он находит экспериментально. Таким путем Хальбарт обходит основную трудность, относящуюся к расчету вторичного рассеяния в собственном смысле, остроумно сводя задачу к простому вычислению первичного рассеяния.

Исходными для Хальбарта являются две экспериментально найденные им сумеречные кривые: одна — для яркости неба в зените, вторая — для освещенности, создаваемой светлым сегментом. Сравнение кривых показывает, что они идут почти параллельно друг другу. Откуда же берется полученная Хальбартом совершенно разная скорость изменения яркости, создаваемой первичным рассеянием  $B_1$  и вторичным  $B_2$ ? Этот результат Хальбарта ошибочен.

Нетрудно показать, что принятый Хальбартом способ решения задачи содержит в себе одну очевидную опасность. При расчете первичного рассеяния неизбежно приходится предполагать какое-то строение высоких слоев атмосферы: темп изменения  $B_1$  целиком зависит от предполагаемого распределения плотности воздуха в высоких слоях. Между тем  $B_2$ , очевидно, определяется преимущественно рассеянием в нижних слоях (как это получается и по вычислениям Хальбарта) и от строения высоких слоев практически не зависит. Следовательно, вычисленный ход отношения  $B_2/B_1$  зависит от выбранного строения высоких слоев. Беря различное строение верхней атмосферы, можно получить какой угодно ход отношения  $B_2/B_1$ , как это отлично демонстрируется вычислениями Н. М. Штауде<sup>(5)</sup>. По способу Хальбарта заведомо нельзя получить результата, свободного от внутренних противоречий, если не брать модель атмосферы, получающуюся из сумеречных же наблюдений. Но Хальбарт взял совсем другую модель — в этом состоит его логическая ошибка.

Строение высоких слоев атмосферы, принятое Хальбартом, неправильно и само по себе. Теперь хорошо известно, что в высоких слоях атмосферы плотность убывает с высотой гораздо медленнее, чем принимает Хальбарт<sup>(6)</sup>. Если повторить вычисления даже по методу Хальбарта, но беря общепринятые теперь представления о строении атмосферы, то получится лишь медленное изменение величины отношения  $B_2/B_1$ . Вряд ли стоит воспроизводить подобные выкладки, коль скоро одним из нас разработан метод, позволяющий решать обсуждаемую задачу на строгой теоретической основе. Принципиальные моменты этого метода были уже опубликованы<sup>(3)</sup>. Вычисления

дают для отношения  $B_2/B_1$  при различных зенитных расстояниях Солнца  $z_{\odot}$  следующие значения (для зенита):

$z_{\odot} = 94^{\circ}34'$ ;	$B_2/B_1 = 0,36$ [0,01];	$z_{\odot} = 99^{\circ}36'$ ;	$B_2/B_1 = 1,25$ [18]
96°25'	0,34 [0,11]	100°9'	1,82 [185]
		102°2'	1,44 [2,3·10 <sup>4</sup> ]
97°52'	0,73 [1,3]	102°52'	1,8 [2,9·10 <sup>5</sup> ]

В этой таблице в квадратных скобках указаны значения, полученные ранее Хальбартом (2).

Необходимо также отметить, что плотности атмосферы вплоть до самых высоких слоев, вычисленные по сумеречным данным без поправок на вторичное рассеяние, хорошо согласуются с определениями, выполненными другими методами (6).

Таким образом, совершенно ясно, что результат Хальбарта, снова подтвержденный им (4) в 1947 г., о быстром увеличении доли вторичного рассеяния света в яркости сумеречного неба в зените по мере увеличения  $z_{\odot}$  неправилен. Эта доля остается достаточно малой в любой момент сумерек. Сумеречный метод применим для исследования атмосферы вплоть до самых высоких слоев (200—250 км). Небольшие поправки на влияние вторичного рассеяния, которые вскоре будет возможным вводить при обработке сумеречных наблюдений с помощью надежных теоретических формул, сделают сумеречный метод исследования стратосферы и ионосферы еще более тонким и эффективным.

Лаборатория атмосферной оптики  
Геофизического института  
Академии Наук СССР

Поступило  
5 I 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. Г. Фесенков, Тр. Главн. Росс. астрофиз. обсерв., 2, 7 (1923). <sup>2</sup> Е. О. Hulburt, JOSA, 28, 227 (1938). <sup>3</sup> Ф. Ф. Юдалевич, ДАН, 55, № 8 (1946).  
<sup>4</sup> Е. О. Hulburt, JOSA, 37, 405 (1947) <sup>5</sup> Н. Штауде, ДАН, 59, № 7 (1948).  
<sup>6</sup> Т. Г. Мегрелшвили и И. А. Хвостиков, ДАН, 59, № 7 (1948).