

## Регистрация фототреков аномально высокой модуляции света в дождях

В.В. Стерлядкин, Т.Н. Гусейнов, К.В. Куликовский\*

Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ)  
107996, г. Москва, ул. Стромынка, 20, кафедра физики

Поступила в редакцию 15.12.2011 г.

В натуральных условиях удалось зарегистрировать цветные треки аномально высокой модуляции света, рассеянного осциллирующими дождевыми каплями. Фотографирование цветных траекторий капель дождя при их освещении снизу белым светом и углах рассеяния вблизи радуги первого порядка позволяет определять параметры каждой отдельной капли: частоты ее колебаний, размер, форму, моды колебаний. Зарегистрированы и описаны различные виды двойных и тройных треков (мультитреков), форма и цветность которых зависят от модового состава колебаний капель в дожде. Расшифровка формы мультитреков, по-видимому, позволит получить ценные данные о таком сложном и малоизученном процессе, как деформация и вибрация дождевых капель. Эти данные важны для решения задач распространения электромагнитных волн в атмосфере и для интерпретации результатов поляризационных измерений в радарной метеорологии.

*Ключевые слова:* рассеяние света в дождях, форма капель, вибрация капель дождя, фототреки, мультитреки, моды колебаний капель; light scattering in rains, raindrop shape, raindrop oscillations, photo track, multitracks, drop oscillation modes.

Термин «аномально высокая модуляция рассеянного света» был использован в 1988 г. для описания обнаруженного нами явления аномально сильной амплитудной модуляции света, рассеянного вибрирующими каплями воды в диапазоне углов рассеяния 135–141° [1, 2]. Это явление позволяет регистрировать деформации капли с амплитудой 4 мкм с расстояния 4 м! Даже в микроскоп такие деформации зарегистрировать непросто.

В лабораторных условиях при измерении индикатрис рассеяния вибрирующих капель воды и поиске углов рассеяния наиболее чувствительных к деформации капель были обнаружены направления, при которых глубина модуляции рассеянного света намного превышала предполагаемый уровень в единицы процентов. Оказалось, что существуют направления рассеяния, при которых относительно темная осциллирующая капля начинала формировать импульсы света, амплитуда которых в десятки раз превышает фоновый уровень рассеяния у капли без вибрации.

Объяснение явления заключалось в перемножении двух факторов. *Первый* заключался в том, что угловое положение радуги первого порядка у деформированных капель воды очень чувствительно к малым деформациям. *Второй* — в том, что индикатриса рассеяния капли вблизи радуги первого порядка имеет локальный максимум с очень крутым склоном,

обусловленным лишь дифракцией. Поэтому периодическое смещение радуги в область «темноты» приводит к «вспыхиванию» темной капли с частотой ее вибрации при наблюдении вблизи углов рассеяния 135–140° [2, 3].

Аномально высокую модуляцию света мы использовали в дождях для изучения микроструктуры и физики процессов в осадках. Были проведены измерения вибрации капель в дождях путем фоторегистрации треков рассеяния на черно-белую фотопленку [1]. Расшифровка формы треков позволила определять размер каждой капли, оценивать ее среднюю форму и амплитуду колебаний. Получены важные зависимости средней формы капель и средней амплитуды колебаний от размера частиц. Такую подробную информацию о дождях удалось получить впервые, что оказалось весьма важным для физики распространения радиоволн в атмосфере и для радиометеорологии. В дальнейшем американские авторы использовали аналогичную методику для изучения вибрации капель в дождях различной интенсивности [4, 5], однако до сих пор многие вопросы, связанные с физикой процессов, не ясны. Неизвестен модовый состав колебаний: ведь даже на основной моде могут возбуждаться 5 типов колебаний, включая горизонтальные, боковые и осесимметричные типы осцилляций. Кроме того, могут возбуждаться и более высокие моды, причем одновременно с основной модой. До сих пор не решен вопрос о причинах возникновения колебаний. Предполагаемыми причинами называют собственные турбулентные вихри за падающей каплей, столкновение капель

\* Виктор Вячеславович Стерлядкин (sterlyadkin@mail.ru); Тогул Намиг оглы Гусейнов (yatogru@mail.ru); Константин Владимирович Куликовский.

и их распад, турбулентные пульсации и порывы ветра [5, 6].

В настоящей статье были продолжены исследования на новом уровне, который оказался доступным благодаря появлению цифровых фотокамер с высоким разрешением. Мы планировали получить цветные треки, поскольку радуги окрашены и их модуляция должна приводить к регистрации цветных треков рассеяния. Нами впервые получены цветные фототреки аномально высокой модуляции, которые несут более полную информацию о поведении каждой капли дождя во время гравитационного падения в атмосфере.

Геометрия эксперимента представлена на рис. 1.

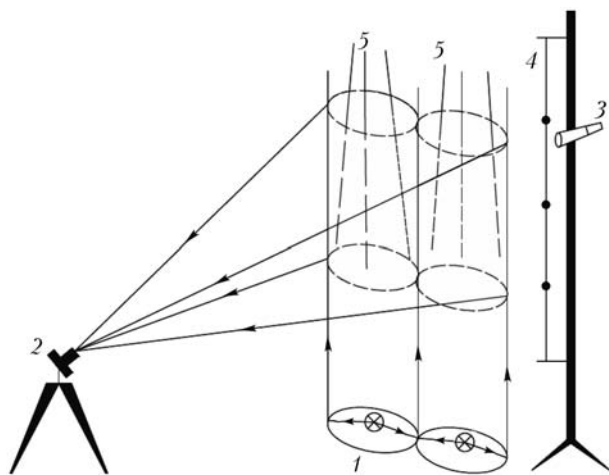


Рис. 1. Геометрическая схема измерений: 1 – параболические излучатели стабилизированного белого света; 2 – цифровой фотоаппарат; 3 – стробоскоп; 4 – метки высоты; 5 – дождевые капли

В ночное время дождевые капли подсвечивались снизу вверх коллимированным белым светом высокой и стабильной интенсивности. Рассеянное падающими каплями излучение регистрировалось на матрицу цифрового фотоаппарата при длительной выдержке, составляющей 0,4–0,8 с. Для точной пространственной и угловой градуировки фотоснимков рядом с осветителем была натянута градуировочная нить с калибровочными метками. Представленная схема позволяла определять углы рассеяния с точностью 0,1°. С целью определения частоты вибрации и скорости гравитационного падения капель часть области измерений дополнительно освещалась стробоскопом с заданной частотой вспышек  $f_{стр}$ .

Для получения цветных треков в диапазоне углов рассеяния вблизи радуги первого порядка требуется, чтобы и падающее на капли излучение, и регистрируемое фотокамерой рассеянное излучение имели угловую расходимость, много меньшую, чем спектральная ширина радуги первого порядка  $\Delta\theta_{рад}$ . Данная величина для сферических капель воды составляет  $\Delta\theta_{рад} = \theta_{рад}(\lambda_{кр}) - \theta_{рад}(\lambda_{син}) = 0,03$  рад [3]. Эта оценка указывает, что расходимость падающего света и угловая ширина принимаемого потока не должны превышать 0,005 рад. Кроме того, падающие капли при наличии ветра не должны сразу вылетать

из светового пучка, а длина освещенного трека должна составлять не менее 1 м, что накладывает определенные требования на сечение коллимированного пучка. По нашим оценкам оно должно составлять не менее 0,3 м<sup>2</sup>.

В качестве осветителя мы использовали два параболических зеркала с фокусным расстоянием  $F$  240 мм и ксеноновые лампы с дуговым газовым разрядом. Дуга имела размеры 0,4 мм в ширину и 11 мм в длину. При расположении лампы в фокальной плоскости коллиматора расходимость излучаемого светового потока  $\Delta\theta_{изл} \approx d/F$ , где  $d$  – размеры дуги,  $F$  – фокусное расстояние коллиматора. В результате в поперечной плоскости относительно оси дуги  $\Delta\theta_{изл} \approx 0,4/240 = 0,0017$  рад, что вполне укладывалось в требуемые рамки. Достоинством выбора ксеноновых ламп является и то, что их можно питать от аккумулятора, что позволило получать стабильное по интенсивности излучение. Фотографирование проводилось с помощью цифровой фотокамеры, матрица которой обеспечивала регистрацию 18 млн пикселей. При апертуре приемника  $D = 10$  мм и расстоянии до измеряемого объема  $L$  около 3,5 м усреднение принимаемого потока происходило в интервале углов  $\Delta\theta_{пр} \approx D/L = 0,003$  рад, что также не превышало необходимые угловые характеристики.

На рис. 2 (см. цв. вклейку) представлены типичные цветные треки аномального рассеяния, полученные 21 августа 2011 г. в дожде.

Углы рассеяния указаны слева. Справа представлен увеличенный фрагмент нижней части треков в диапазоне углов 130–139°, на котором отчетливо видны цветные края у световых импульсов, формируемых осциллирующими каплями.

Для объяснения характера треков следует обратиться к индикатрисе рассеяния сферической капли вблизи радуги первого порядка (рис. 3).

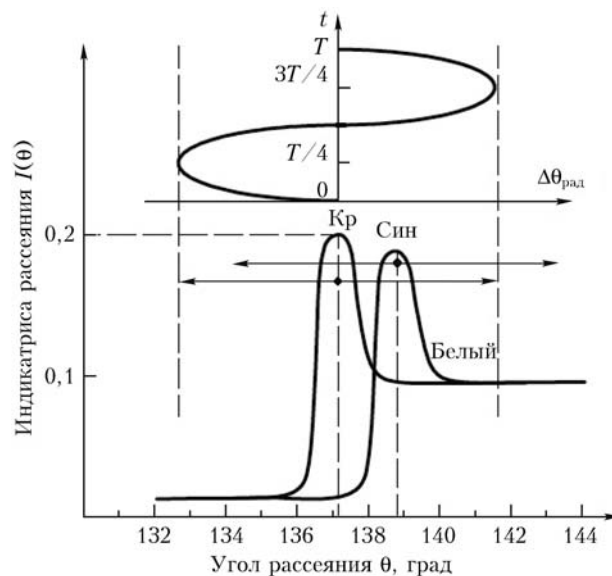


Рис. 3. Участок индикатрисы рассеяния сферической капли воды вблизи радуги первого порядка. Вибрация на основной гармонике с амплитудой  $\Delta D/D = 0,015$  приводит к периодическому сдвигу максимумов примерно на 4,5°

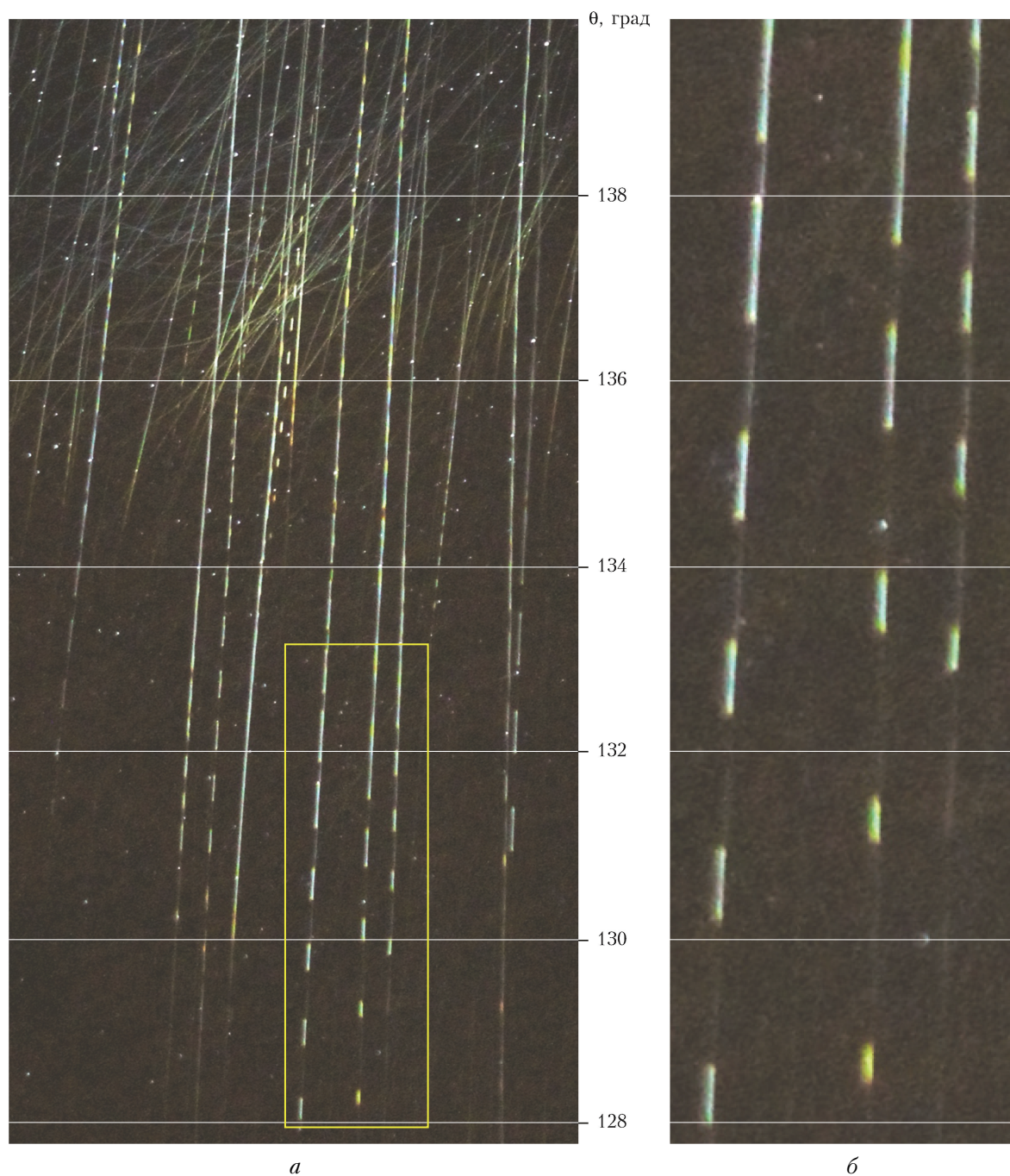
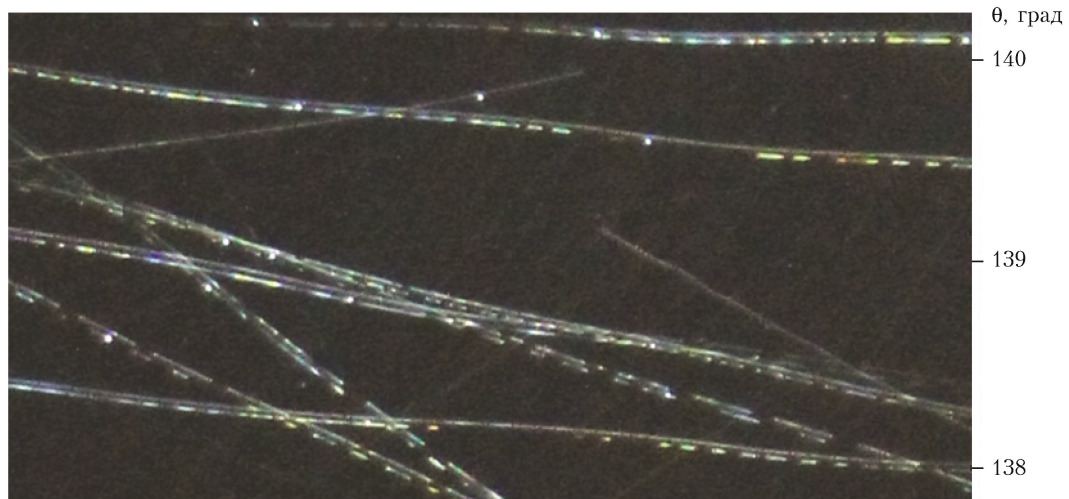
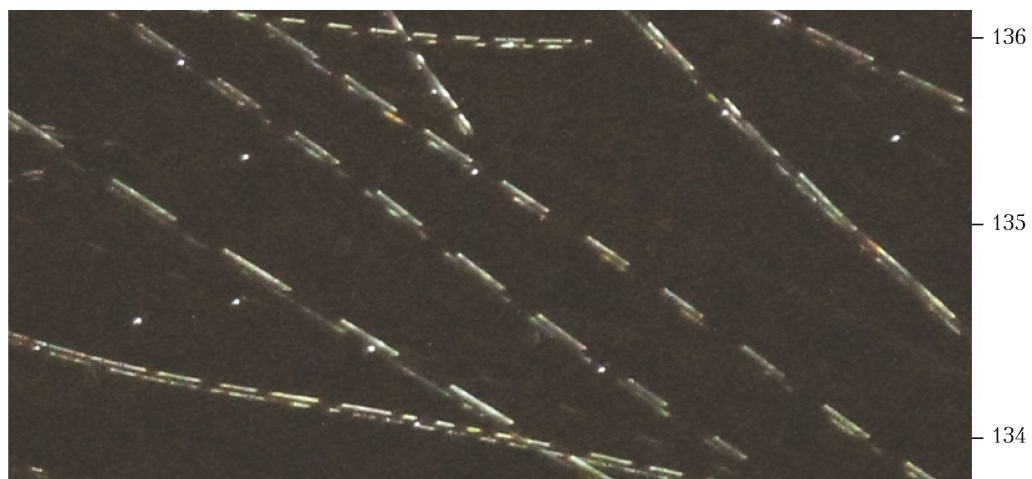


Рис. 2. Кадр на матрице фотокамеры с изображением треков, сформированных дождевыми каплями в процессе падения. Подсветка снизу производится стабилизированным белым светом, сбоку капли подсвечены стробоскопом: *a* — полный фрагмент; *б* — увеличенная нижняя часть кадра, на которой видны цветные края импульсов





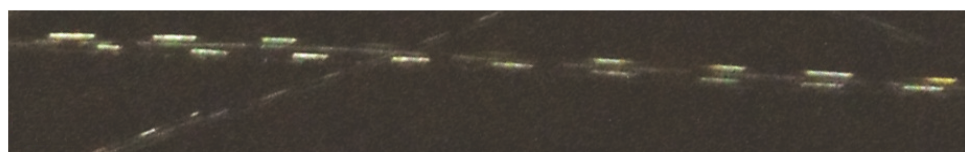
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 4. Мультитреки, зарегистрированные при сильном горизонтальном порыве ветра (*a*); треки в средней части фотографий при углах рассеяния 134–136° (*б*); модуляции треков (углы 128–130°) обусловлены лучом «З» (радугой первого порядка) (*в*); тройная линия трека регистрируется только у крупных капель диаметром свыше 3 мм (*г*)

Радуга представляет собой локальный максимум на индикатрисе, положение которого за счет дисперсии различно для разных длин волн. Индикатриса для красного излучения обозначена «кр», для синего – «син», промежуточные цвета не показаны. Дисперсионная ширина радуги первого порядка  $\Delta\theta_{\text{рад}} = \theta_{\text{рад}}(\lambda_{\text{син}}) - \theta_{\text{рад}}(\lambda_{\text{кр}})$  составляет примерно  $1,5^\circ$ . Начиная с углов рассеяния  $\theta > 139,5^\circ$ , рассеянный каплей свет является «белым», поскольку складываются индикатрисы примерно одинаковой интенсивности. Периодическую деформацию капли на первой осесимметричной моде колебаний можно аппроксимировать то сплюснутым, то вытянутым эллипсоидами вращения, форму которых обычно задают коэффициентом формы  $\gamma = c/a$ , равным отношению вертикальной полуоси  $c$  эллипсоида к его горизонтальной полуоси  $a$ .

Расчеты индикатрис для такой деформации капель показали, что эллиптическая деформация при падении света вдоль оси вращения приводит к сильному смещению положения радуги первого порядка. Для коротковолнового диапазона ( $\lambda = 0,4$  мкм) и соответствующего показателя преломления  $n = 1,343$  эта зависимость имеет вид  $\Delta\theta_{\text{рад}} = 95\Delta\gamma$ , а для красного края спектра ( $\lambda = 0,8$  мкм) и  $n = 1,328$  – вид  $\Delta\theta_{\text{рад}} = 89\Delta\gamma$ , где  $\Delta\gamma = \gamma - 1$  [7]. Связь между изменением диаметра капель в горизонтальном сечении  $\Delta D/D$  и величиной  $\Delta\gamma$  имеет вид  $\Delta\gamma = -3\Delta D/D$ , поэтому даже незначительное изменение горизонтального размера капель  $\Delta D/D$  на  $1,5\%$  приводит к сильному смещению радуги на  $4,5^\circ$ , что в 3 раза больше, чем дисперсионная ширина радуги!

Форма и характер импульсов, формируемых осциллирующей каплей при различных углах наблюдения, показаны на рис. 3 при периодическом смещении радуги с амплитудой  $4,5^\circ$ . Пусть угол наблюдения  $\theta_{\text{набл}}$  равен  $136^\circ$ , тогда в первую четверть периода  $T$  колебаний капля начинает сплющиваться, радуга смещается влево и слабый свет, рассеиваемый сферической каплей, заменяется интенсивным красным, а затем синим максимумом, уровни которых почти в 30 раз больше начального фона. Затем следует белый участок, превышающий фон примерно в 10 раз. Это происходит в первую четверть периода колебаний. Во вторую четверть все повторяется в обратном порядке. В третью и четвертую четверти периода капля становится вытянутой по вертикали и будет темной, так как радуги уходят вправо к большим значениям угла  $\theta$ . В результате капля формирует вспышку света с цветными краями, которая за счет движения капли регистрируется на матрице фотоаппарата в виде цветного трека (см. рис. 2, б). При уменьшении угла наблюдения, например до  $\theta_{\text{набл}} = 134^\circ$ , только красный максимум в конце первой четверти периода достигнет угла наблюдения, а синий и тем более белый участки за радугой угла  $\theta_{\text{набл}} = 134^\circ$  не достигают. Поэтому капля сформирует короткий красный импульс, что можно наблюдать на рис. 2, б в нижней части среднего трека.

При увеличении угла наблюдений длительность формируемых импульсов увеличивается. Например, при  $\theta_{\text{набл}} = 140^\circ$  капля лишь в конце третьей четвер-

ти периода колебаний и начале четвертой четверти будет темной, а длительность импульса составит почти  $7/8$  периода. Дальнейшее увеличение угла наблюдений приводит к тому, что импульсы сливаются и фототрек становится сплошным (см. рис. 2, б, средний трек, верхняя часть). Очевидно, что чем больше амплитуда колебаний, тем в большем диапазоне углов наблюдаются вспышки на треке. Кроме того, среднее сплющивание капли во время гравитационного падения приводит к тому, что угловое положение импульсов смещается к меньшим углам, а на фотографии смещается вниз. Поэтому по угловому положению первого разрыва на треке и положению последней вспышки можно получить и среднюю форму подающей капли, и ее амплитуду колебаний. Такая методика применялась в работе [1] при обработке черно-белых фотографий.

В нашем эксперименте в дополнение к постоянному освещению снизу был добавлен стробоскоп, который с заданной частотой  $f_{\text{стр}}$  генерировал короткие импульсы длительностью около 1 мкс. Это позволило на средней части треков получать метки стробов и по ним точно определять частоту колебаний каждой капли, а следовательно, и их объем по формуле Рэлея для собственных капиллярных колебаний капель. Одновременно можно вычислять скорость вертикального и бокового движения капель, оценивать интенсивность вертикальных потоков воздуха и интенсивность турбулентности. Данные метки также позволяют определять ускорения, которые испытывают капли на своей траектории за счет вихревого движения воздуха и ветровых порывов. Однако на данном этапе исследований эту информацию мы не интерпретировали.

Дальнейшие исследования параметров дождевых капель и условий, в которых происходило их гравитационное падение, проводились с использованием полученных фотографий. На каждом треке определялись расстояние между двумя соседними метками стробов  $L_0$  и пространственный период колебаний капли  $\Delta L_{\text{фото}}$ , выраженный в пикселях или координатах на фотоматрице. Исходя из геометрии измерений, эти величины пересчитывались в натурные величины и пространственный период колебаний  $\Delta L_{\text{факт}}$ . Частота колебаний капли  $f$  определялась как  $f = f_{\text{стр}} L_0 / \Delta L_{\text{фото}}$ . Одновременно находилась фактическая скорость гравитационного падения данной капли как  $V_{\text{верт}} = f_{\text{стр}} L_{0\text{факт}}$ . Поскольку частота колебаний капли связана с ее объемом по формуле Рэлея, мы получаем объем и эквивалентный сферический диаметр  $D_{\text{сф}}$  каждой капли. Полученные данные позволяют оценить интенсивность вертикальных движений в области, над объемом измерений, где формируется вертикальная составляющая скорости капель. Действительно, скорость гравитационного падения капель в невозмущенной атмосфере четко связана с размером капли  $D_{\text{сф}}$ , поэтому для каждой капли можно оценить ожидаемую скорость ее гравитационного падения и сравнить с фактической скоростью  $V_{\text{верт}}$ . При различиях, которые превышают погрешности измерений и повторяются у всех зарегистрированных капель, можно однозначно сделать вывод

о наличии и величине восходящих или нисходящих движений. Дальнейшая обработка треков направлена на получение информации о средней форме капель и их амплитуде вибрации. Положения первого разрыва на треке  $\theta_1$  и последней вспышки  $\theta_2$  на каждом треке определяются средней формой капли и амплитудой колебаний. Диапазон углов, на котором капля вибрировала,  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ , пересчитывался в амплитуду деформации капли  $\Delta\gamma$  по выведенной формуле  $\Delta\gamma = 0,011\Delta\theta$ , в соответствии с [7]. Аналогично среднее значение углов, при которых происходила вибрация,  $\theta_{\text{ср}} = (\theta_1 + \theta_2)/2$ , позволяло оценивать среднюю форму каждой капли  $\gamma_{\text{ср}}$ .

Однако новые натурные результаты, полученные в августе–сентябре 2011 г. с помощью цифровых камер высокого разрешения, оказались весьма необычными, и не укладывались в предложенные ранее модели. Во-первых, практически все треки от крупных капель, движение которых сильно отклонялось от вертикали, имели двойные или тройные линии (рис. 4, см. цв. вклейку). Назовем их мультитреками. Причем при различных углах рассеяния характер этих мультитреков принципиально изменялся. На рис. 4, а представлен фрагмент треков при углах рассеяния  $138\text{--}140^\circ$ . В момент фотосъемки капли двигались почти горизонтально за счет сильного порыва ветра. При этом, судя по четким и ярким импульсам модуляции, амплитуда колебаний практически у всех капель была значительной. На рис. 4, а виден двойной след капли, причем верхняя линия трека имеет белый цвет и почти не модулирована, а нижняя имеет четкую цветную окраску, что говорит о модуляции света за счет радуги. При углах рассеяния  $134\text{--}136^\circ$  цветную модуляцию имеют уже обе линии треков (рис. 4, б). При  $\theta = 128 \div 130^\circ$  (рис. 4, в) цветную модуляцию имеет верхняя линия, а нижняя становится слабой по интенсивности, белой по цвету и имеет слабую модуляцию. Кроме того, иногда формируется трек, состоящий из трех линий: средняя имеет слабую интенсивность и небольшую модуляцию, а верхняя и нижняя – цветную модуляцию (рис. 4, г).

Очевидно, появление мультитреков связано с тем, что падающий на каплю свет, взаимодействуя с границей раздела капли, отражается и преломляется многократно. При этом из различных частей капли выходят несколько лучей, которые принято называть производными лучами. На рис. 5, а представлена геометрия формирования производных лучей для капли, имеющей форму сплющенного сфероида при ее освещении снизу вдоль оси ОУ.

Луч «0» является падающим, при первом взаимодействии с границей формируется первый производный луч «1», обусловленный отражением. Для капель воды коэффициент отражения в соответствии с формулами Френеля составляет  $3\text{--}8\%$  в зависимости от угла падения и поляризации, поэтому луч «1» имеет небольшую интенсивность. Большая часть потока ( $\sim 95\%$ ) преломляется внутрь капли, и при втором взаимодействии с границей формируется дважды преломленный луч «2», в котором заключена основная часть рассеяния потока (около  $90\%$ ).

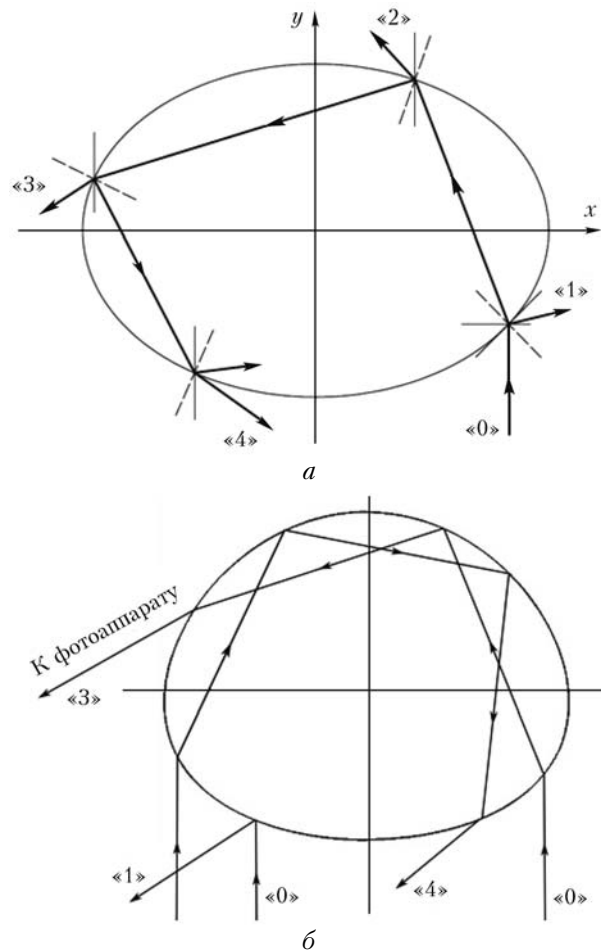


Рис. 5. Геометрия формирования производных лучей. Падающие снизу на каплю лучи обозначены «0», выходящие из капли производные лучи обозначены «1», «2», «3», «4» (а); ход лучей в капле при формировании мультитреков. Лучи «1», «3», «4» формируют среднюю, верхнюю и нижнюю линии мультитреков соответственно. Луч «2» в фотоаппарат не попадает (б)

Луч «2» рассеивается под углами  $\theta = 0 \div 70^\circ$  и при нашей геометрии измерений в диапазон углов  $\theta = 125 \div 160^\circ$ , который регистрируется фотоаппаратом, этот луч никогда не попадает. Однако именно лучом «2» формируются на фототреках рассеянные импульсы стробоскопа, который излучает не снизу, а сверху и сбоку от области измерений (см. рис. 1). Третий производный луч «3» формируется при третьем взаимодействии луча с поверхностью. Его диапазон изменений  $180\text{--}137^\circ$ , причем именно при  $137\text{--}139^\circ$  на разных длинах волн формируются радуги первого порядка, которые смещаются при сплющивании капли к меньшим углам. Луч «4» значительно менее интенсивен, чем предыдущие лучи, хотя радуга второго порядка, сформированная этим лучом, регистрируется на фотографиях при  $126\text{--}130^\circ$  в виде слабой линии.

На рис. 5, б показано, как должны распространяться лучи в капле, чтобы затем одновременно попасть в объектив фотокамеры, расположенной под углом, например,  $136^\circ$ .

Форму капли мы возьмем не эллипсоидальную, а несколько сплюсненную снизу в соответствии с данными, полученными американскими авторами путем фотографирования капель в вертикальных башнях [8, 9]. Из рис. 5, б видно, что в направлении фотокамеры могут распространяться лучи «1», «3» и «4», которые выходят из различных точек на поверхности капли. Если капля падает строго вертикально, то треки на фотоматрице, оставленные лучами «1», «3» и «4», накладываются друг на друга, формируя одну вертикальную линию трека. Если же капля будет двигаться дополнительно в горизонтальном направлении (наклонный трек), то траектории лучей «1», «3» и «4» не совпадут и при достаточном пространственном разрешении фотоматрицы крупные капли создадут двойные или тройные прерывистые линии. Из рис. 5, б следует, что луч «1» — первый отраженный луч, располагается между лучами «3» и «4», поэтому он формирует среднюю линию мультитрека при условии, что чувствительности камеры достаточно для его регистрации. (Заметим, что интенсивность этого луча почти в 30 раз слабее радуги.) Луч «3» создает радугу первого порядка, располагается выше луча «1» и приводит к созданию верхней линии трека, которая модулирована цветными импульсами за счет модуляции этой радуги. Луч «4» отвечает за радугу второго порядка, и именно им из геометрических соображений очень удобно было бы объяснить нижние линии мультитреков.

С учетом геометрии расположения лучей рассмотрим мультитреки более подробно. Верхние треки (см. рис. 4, а) при углах рассеяния  $138\text{--}140^\circ$  имеют двойной след, причем верхняя линия трека белая и почти не модулирована. По своему положению она соответствует третьему производному лучу, который наблюдается при углах выше радуги и, следовательно, должен быть белым. Отсутствие цветной модуляции, по-видимому, объясняется тем, что у сплюсненных капель радуга сдвинута к меньшим углам рассеяния и при модуляции не достигает высоких углов наблюдения. Этот случай соответствует рис. 3 при угле наблюдения  $141^\circ$  и амплитуде сдвига радуги  $\Delta\theta$  меньше  $2^\circ$ . Нижняя линия треков на рис. 4, а имеет четкую цветную окраску, что говорит о модуляции света за счет радуги. По своему геометрическому положению нижняя линия соответствует четвертому производному лучу, т.е. радуге второго порядка, однако есть факторы, которые заставляют усомниться в такой трактовке данной линии трека. К этому вопросу мы возвратимся чуть позже. Рассмотрим форму на рис. 4, б. Большинство треков представляют собой двойную линию с яркой цветной модуляцией и верхней, и нижней линиями трека. Модуляция верхней линии однозначно связана с лучом «3» (радугой первого порядка), а модуляцию нижней линии за счет ее геометрического положения можно отнести к лучу «4» (радуге второго порядка) по аналогии с трактовкой нижней линии на рис. 4, а. В отношении треков на рис. 4, г вопросов практически не возникает, так как яркая модуляция верхней линии трека и по расчетам, и по геометрии объясняется лучом «3», а слабая нижняя линия, по-

видимому, связана с лучом «4». По этим трекам мы можем надежно определять частоту основной моды колебаний, размер капель, а затем использовать эту информацию для интерпретации формы треков на рис. 4, а–в.

Остановимся подробнее на ряде вопросов, которые возникают при интерпретации нижних линий на треках (см. рис. 4, а, б). Из геометрического расположения их в нижней части капли мы сделали предположение о том, что эта линия формируется лучом «4», т.е. радугой второго порядка. Противоречием является то, что в диапазоне углов  $134\text{--}140^\circ$  нижняя линия имеет большую интенсивность, сравнимую с радугой первого порядка, в то время как радуга второго порядка обычно имеет интенсивность на порядок меньше. Другое противоречие заключается в том, что у сферической капли радуга второго порядка наблюдается при  $128^\circ$ , а не при  $136\text{--}140^\circ$ , а расчеты радуги второго порядка для сфероидальных сплюсненных капель дают ее смещение не к большим, а к меньшим углам [3]. Третье несоответствие связано с большой дисперсионной шириной второй радуги, что должно снижать яркость цветной модуляции. Четвертое возражение заключается в том, что вторая радуга и при сплющивании и при вытягивании эллипсоидальной капли по вертикали смещается в одну и ту же сторону к меньшим углам. Поэтому частота модуляции света за счет второй радуги должна удвоиться по сравнению с частотой модуляции первой радуги, но этого не происходит (см. рис. 4, б).

На наш взгляд, это несоответствие может объясняться двумя возможными вариантами. Первое предположение заключается в том, что капля в действительности не является эллипсоидом и это может приводить к увеличению интенсивности второй радуги и ее смещению к большим углам рассеяния. Вторая версия заключается в том, что в капле возбуждаются такие типы колебаний, при которых радуга первого порядка расщепляется на два луча, интенсивность и цветная модуляция которых сравнимы. В пользу такой трактовки служат и треки капель на рис. 4, б, полученные при углах рассеяния  $134\text{--}136^\circ$ . Обе линии имеют ярко выраженную цветную модуляцию с одинаковой частотой и примерно равной интенсивностью. Поэтому полагаем, что версия о разделении радуги второго порядка на два луча при сложных типах колебаний представляется более правдоподобной, однако ее подтверждение требует дополнительных исследований и расчетов.

В заключение отметим, что предложенная методика измерения треков аномально высокой модуляции света, рассеянного дождевыми каплями, дает в распоряжение исследователей эффективное средство изучения физики осадков. Метод позволяет с высокой точностью определять размер каждой капли, частоту ее колебаний, скорости вертикального и горизонтального движения и ускорение капли вдоль ее траектории. Удастся оценить среднюю форму и амплитуду основной гармоники колебаний, указать наличие неосесимметричных типов колебаний и высоких гармоник. Регистрация мультитреков, по нашим предположениям, позволит определить

модовую структуру колебаний капли даже при одновременном возбуждении нескольких различных мод. К сожалению, на нынешнем этапе исследований полная и корректная интерпретация модовой структуры колебаний не представляется однозначной. Решение этой задачи требует расчета индикатрис рассеяния капель реальной формы при наличии основных типов колебаний. Расчет таких оптических характеристик является сложной задачей, которая еще ожидает своего решения.

1. *Стерлядкин В.В.* Натурные измерения колебаний капель осадков // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1988. Т. 24, № 6. С. 613–621.
2. *Стерлядкина Е.А., Стерлядкин В.В.* Рассеивающие свойства вибрирующей капли // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64, вып. 3. С. 685–688.
3. *Стерлядкин В.В.* Индикатрисы рассеяния эллипсоидальных капель воды // Оптика и спектроскопия. 1990. Т. 69, вып. 6. С. 1357–1362.

4. *Beard K.V., Tokay A.* A Field Study of Small Raindrop Oscillations // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18, N 12. P. 2257–2260.
5. *Tokay A., Beard K.V.* A Field Study of Raindrop Oscillations. Part I: Observation of Size Spectra and Evaluation of Oscillation Causes // J. Appl. Meteorol. 1996. V. 35, N 10. P. 1671–1687.
6. *Beard K.V., Bringi V.N., Thurai M.* A New Understanding of Raindrop Shape // Atmos. Res. 2010. V. 97, iss. 4. P. 396–415.
7. *Стерлядкин В.В.* Рассеяние света дождевыми каплями // Оптика атмосф. и океана, 2000. Т. 13, № 5. С. 534–538.
8. *Thurai M., Bringi V.N., Szakáll M., Mitra S.K., Beard K.V., Borrmann S.* Drop Shapes and Axis Ratio Distributions: Comparison between 2D Video Disdrometer and Wind-Tunnel Measurements // J. Atmos. and Ocean. Technol. 2009. V. 26, N 7. P. 1427–1432.
9. *Andsager K., Beard K.V., Laird N.F.* Laboratory Measurements of Axis Ratios for Large Raindrops // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56, N 15. P. 2673–2683.

*V.V. Sterlyadkin, T.N. Guseinov, K.V. Kulikovsky.* **Recording of photo tracks of anomalously high light modulation in rains.**

The color tracks of anomalously high modulation of light, scattered by oscillating raindrops, were recorded under field conditions. Photo registration of color trajectories of falling raindrops at scattering angles near first order rainbow when lighting up from below by white stable light allows us to derive the main drop parameters: modulation frequency, volume, average form, oscillation mode, and oscillation amplitude of each registered droplet. A different form of double and triple tracks (multitracks), color modulation of which depends on oscillation mode composition, were registered and described. Decoding of multitrack modulation form probably allows us to get important information about so complicated and little-studied process as drop deformations and oscillation structure of falling raindrops. These data are of great importance for problems of propagation of electromagnetic waves in atmosphere and for interpretation of polarization measurements in radar meteorology.