

Радужный танец дождевых капель

В.В.Стерлядкин

Чем пристальней мы вглядываемся в природу, тем больше наше удивление от красоты и непредсказуемости открывающегося мира. Подтверждением тому может служить простая капля воды. На рис.1 представлены фотографии обычного дождя, который раскрасил ночное небо цветными гирляндами. Мои друзья в попытках отгадать, что изображено на этих фотографиях, метались от следов летающих тарелок до новогоднего салюта. Никому и в голову не приходило, что это простые капли воды.

Дождь в роли фото модели

Фотографирование дождевых капель проводилось в ночное время по схеме, представленной на рис.2. Снизу дождь подсвечивался белым светом постоянной интенсивности, штатив фотоаппарата располагался на расстоянии 2–3 м от луча, а рассеянный каплями свет регистрировался в диапазоне углов рассеяния Θ от 125 до 150°. Дополнительно дождевые капли освещались сбоку стробоскопом, который оставлял метки на каждом треке, что позволяло определять скорость движения каплей и частоту их колебаний [1].

Полная картина дождя при такой подсветке и открывании затвора фотоаппарата на 0.8 с показана на рис.3. Слева указа-



Виктор Вячеславович Стерлядкин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Московского государственного университета приборостроения и информатики. Область научных интересов — оптика атмосферы, обратные задачи радиофизики и радарной метеорологии. Автор нового научного направления — доплеровская томография.

ны углы рассеяния Θ . В средней части кадра (при $137 < \Theta < 139^\circ$) видны тонкие цветные линии, составленные мелкими каплями диаметром 0.6–1.2 мм. Именно они создают радугу, которую все так любят наблюдать после дождя.

Более крупные капли на фотографии оставили длинные яркие прерывистые линии, расцвеченные «всеми цветами радуги». Это образное выражение к описанному явлению имеет абсолютно буквальное отношение (как мы помним из школьного курса физики, разложение белого света в спектр происходит благодаря зависимости показателя преломления среды от длины волны). Оказывается, «цветомзыка» капель объясняется двумя фактами. Первый — капли дождя во время падения периодически меняют свою форму, вибрируют; второй — вибрация капли приводит к периодичес-

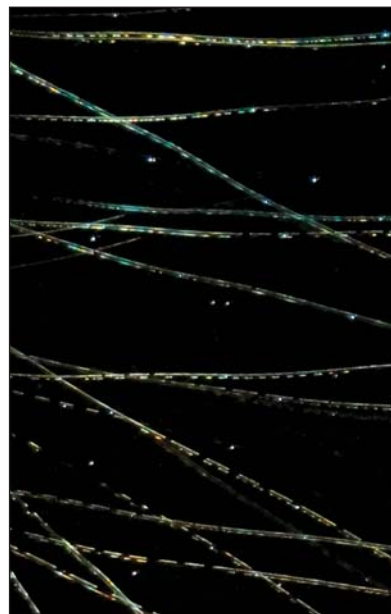


Рис.1. На снимке, с большим увеличением, зарегистрирован сильный горизонтальный порыв ветра. Каждая капля оставляла двойной след при движении.

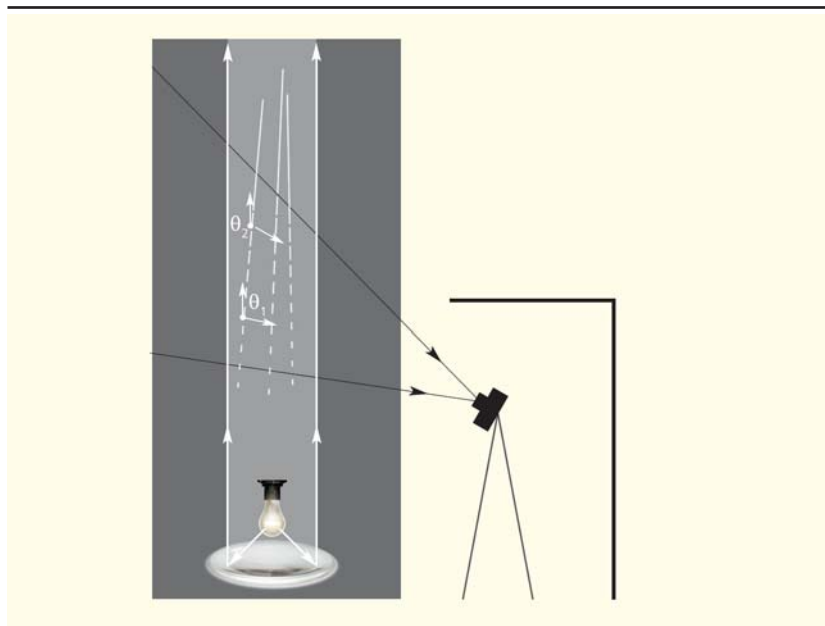


Рис.2. Схема ночного фотографирования дождевых капель, подсвеченных снизу стабильным белым светом. Чем выше капля, тем больше угол рассеяния Θ .

кому угловому сдвигу радуги, спектр которой очень чувствителен к деформации капли [1]. В результате преломленные лучи и радуги образуют цветные прерывистые треки на фотогра-

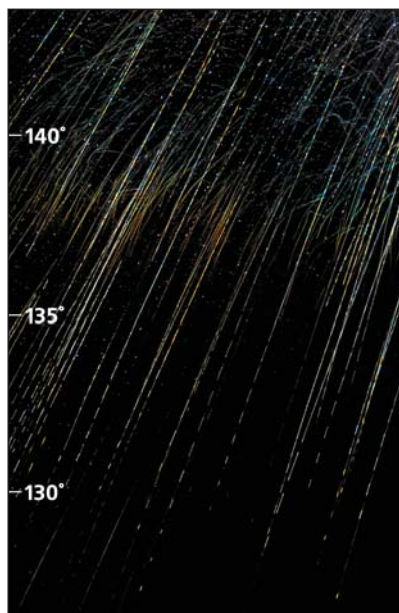


Рис.3. Фотография дождя при небольшом увеличении и выдержке 0.8 с. В диапазоне 137—139° мелкие капли формируют радугу, а крупные за счет вибрации создают прерывистые треки.

фиях. Наши измерения показали, что в дождях осциллируют практически все капли, размер которых превышает 0.9 мм. По-видимому, более мелкие капли также колеблются, но из-за дифракции света на частицах малых размеров эти колебания очень трудно зарегистрировать. Механизм возбуждения колебаний дождевых капель до сих пор не вполне понятен. Возможными причинами могут быть турбулентность воздушных потоков, через которые движется капля, порывы ветра, столкновения и слияние капель (коагуляция), разрушение крупных капель при падении. Не исключается механизм возбуждения автоколебаний за счет периодического воздействия на каплю собственного турбулентного следа. Вполне возможно, что в реальности задействованы все перечисленные механизмы.

На рис.4 треки мелких и более крупных капель показаны с большим увеличением. Капля, отмеченная на рис.4 цифрой 1, очень мала и имеет диаметр около 0.8 мм. По мере ее падения угол рассеяния Θ между направлением падающего света

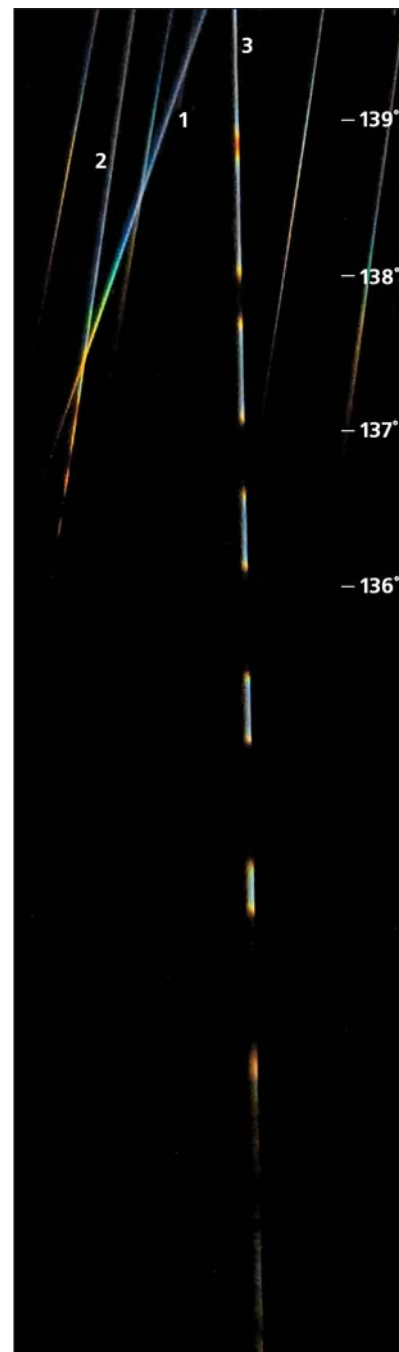


Рис.4. Небольшой участок кадра при сильном увеличении. Мелкая капля 1 почти сферическая и не вибрирует, ее цвет меняется по мере падения вместе с углом рассеяния; капля 2 чуть больше, поэтому немного сплющивается, ее радуга чуть-чуть сдвигается вниз и дополнительно прерывается за счет небольшой вибрации; капля 3 (диаметром около 2.3 мм) кроме сплющивания испытывает вертикальные колебания с амплитудой $\Delta D/D = 0.01$.

и направлением регистрируемого, рассеянного, света уменьшался со 140 до 136° , при этом выше радуги, при $\Theta = 140^\circ$, каждая маленькая капля имела белый цвет, затем, при $\Theta = 139^\circ$, начиналась синяя часть радуги, плавно переходящая в зеленую при 138° и затем в красную при 137° . Далее, при $\Theta = 136^\circ$, свеченные капли исчезало. Такая картина соответствует радугам, образованным идеально сферическими каплями. Множество подобных капелек и создают красивые дуги после дождя. Соседний трек 2 на той же фотографии образован при падении более крупной капли диаметром около 1.2 мм. Видно, что все цвета у этого трека сместились ниже к меньшим углам. Это связано с тем, что при падении капель в воздухе капли диаметром более 1 мм начинают сплющиваться в вертикальном направлении, а это сдвигает угловое положение радуги к меньшим углам. Интересно, что след в нижней части начинает прерываться. Такое поведение вызвано периодическим изменением формы капель при падении —

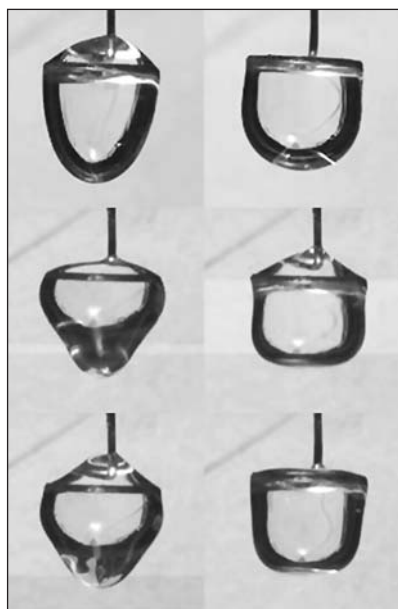


Рис.5. Форма капли при возбуждении осесимметричных мод колебаний (слева). Капли с правых фотографий находятся в противофазе.

их вибрацией. Особенно четко вибрация проявилась на соседнем треке 3, который оставила капля диаметром около 2.3 мм. Здесь радуга разорвана на кусочки, которые окрашены во все цвета только на краях каждой световой полоски. Отметим, что длина полосок по мере падения уменьшается, а при угле около 132° они исчезают совсем.

Давайте разберемся в происходящем более подробно. О форме, которую могут приобретать капли при свободном падении, в журнале «Природа» уже сообщалось [2]. Учитывая давность публикации, коротко повторим некоторые факты, дополним их новыми и более подробно ознакомимся на их физическом объяснении.

На рис.5 представлены мгновенные фотографии формы капель при возбуждении первых трех осесимметричных типов колебаний. О возможности колебаний свободных капель известно со времен Дж.Рэля [3], однако до наших экспериментов [4] эти колебания никто визуально не наблюдал. В лабораторных условиях капли воды были подвешены на смачиваемом колечке из тонкой проволоки, которое могло колебаться в вертикальном направлении с заданной частотой и амплитудой. При совпадении частоты перемещения колечка с собственной частотой колебания капли возникало резонансное увеличение амплитуды колебаний. Верхняя пара фотографий отвечает основной моде колебаний, при которой капля имеет то сплюснутую, то вытянутую форму. Именно такой тип колебаний преимущественно возникает при падении дождевых капель в атмосфере. Частота колебаний на основной моде зависит от размера капель и понижается от 340 Гц для капель диаметром 1 мм до 70 Гц у капель размером в 3 мм. Следующая мода колебаний соответствует форме капли в виде равнобедренного треугольника, вершина которого поочередно направлена то вверх, то вниз.

Частота этой моды вдвое больше первой гармоники. Третья мода характеризуется превращением ромба в квадрат и обратно и имеет почти утроенную частоту. Теоретически этот ряд колебаний бесконечен, однако для дождевых капель возбуждение высоких мод колебаний, по-видимому, маловероятно.

Следующим шагом при исследовании свойств вибрирующих капель было изучение их оптических свойств. Ожидалось, что вибрация капель приведет к модуляции рассеянного оптического излучения в масштабе, сравнимом с изменением сечения капель, т.е. на уровне в несколько процентов. Однако здесь нас ожидал сюрприз. Оказалось, что в некоторых направлениях рассеяния глубина амплитудной модуляции составляла не проценты, даже не десятки процентов: переменная составляющая превышала постоянную часть в десятки раз! Это свойство выразилось в том факте, что деформацию капель в 4 мкм, которую трудно зарегистрировать даже на микроскопе, можно было наблюдать с расстояния 4 м! Данное необычное явление было названо аномально высокой модуляцией света, рассеянного осциллирующими каплями [1]. Расчеты показали, что оно связано с высокой изменчивостью углового положения радуг при деформации капель. В частности, при относительном изменении диаметра капель $\Delta D/D$ всего на 1% угловое положение радуг смещалось почти на 3° , что составляет весьма заметную величину [5]. Картина рассеяния строилась в приближении геометрической оптики. Форма капли и ее изменение во времени задавались аналитически в виде эллипсоида вращения с периодическим изменяющимся эксцентриситетом. Для падающих лучей определялись направления нормали к поверхности капли в точке падения луча, углы падения, отражения, преломления. По формулам Френеля проводился расчет энергии

в каждом луче с учетом поляризации света и телесного угла, в котором распространялся каждый луч. Аналогичные вычисления выполнялись для каждого взаимодействия лучей с границей раздела капли. В результате суммирования всех лучей (как правило, вполне достаточно учесть четыре луча, так как они дают 99.7% всего рассеянного потока) рассчитывалась индикатриса рассеяния осциллирующих капель и положение радуг.

От восхищения к пониманию

На рис.6 показано, как преломляются лучи света в капле и как формируется радуга при освещении белым светом снизу вверх. При первом взаимодействии падающих лучей с границей образуется отраженный луч 1, его интенсивность невелика и составляет 4—6% от падающего излучения. Остальная часть лучей подсветки преломляется, входит в каплю и частично выходит при втором взаимодействии с границей, образуя производный луч 2. Отраженный при втором взаимодействии луч остается внутри капли и при третьем взаимодействии вновь частично выходит из капли. Именно этим лучом 3 и создаются радуги первого порядка. Существуют радуги второго, третьего и более высоких порядков, которые формируются четвертым, пятым и т.д. лучами, однако обычно они имеют очень слабую интенсивность. Разделение белого света в капле происходит, как уже упоминалось, за счет дисперсии — различных показателей преломления воды для разных длин волн. У радуги первого порядка это угловое разделение составляет около 2°: 139° у синего света и 137° у красного. На рисунке мы изобразили радугу первого порядка в виде набора ярких лучиков: красного, зеленого и синего. В действительности эти цвета плавно переходят друг в друга,

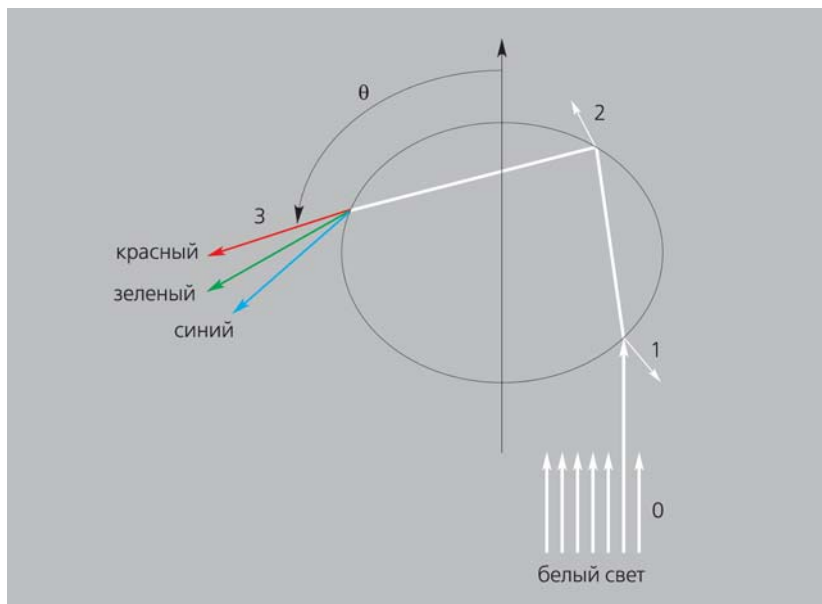


Рис.6. Радугу можно представить как набор ярких разноцветных лучиков, которые рассеиваются каплей в различных направлениях. При сплющивании капли угол радуги уменьшается, лучики смещаются вверх, а при вытягивании капли лучи радуги смещаются вниз.

поэтому данное представление носит условный характер.

Насколько яркими по интенсивности оказываются радуги первого порядка, можно представить из рис.7, на котором

показана интенсивность рассеянного света в зависимости от угла рассеяния (индикатриса). Например, красный луч при угле рассеяния 137° примерно в 30 раз ярче, чем свет, приходя-

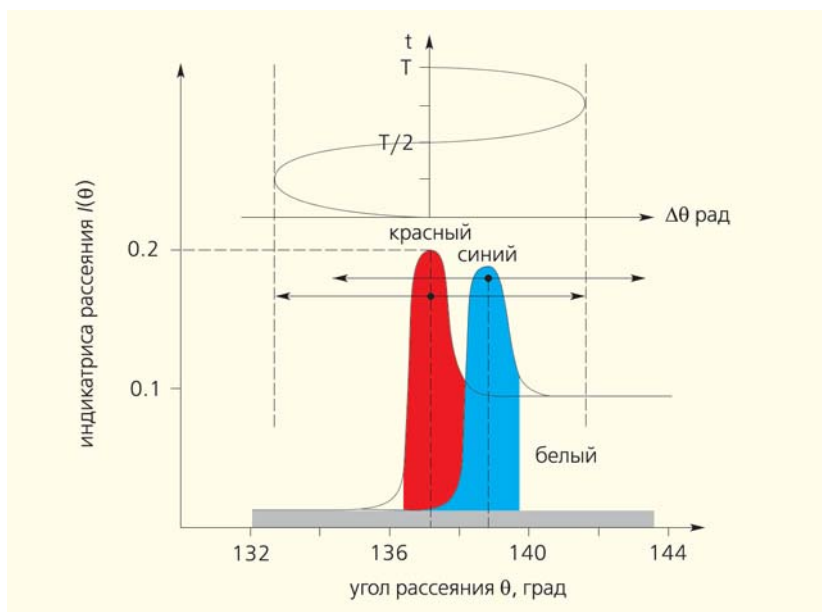


Рис.7. Радуга представляет собой яркие цветные максимумы, угловое положение которых различно у красного и синего света. При вибрации капли радуги периодически смещаются по углам по закону синуса с амплитудой, показанной стрелками [7].

ций от капли при углах, меньших 136° . Рисунок 7 объясняет, почему красный свет в радуге самый яркий: он почти не смешивается с зеленым и синим светом. А вот к зеленому и синему максимумам добавляются другие цвета, поэтому они не так ярко выражены в радуге. Этот график хорошо иллюстрирует фотографии на рис.4. Если капля мала (трек 1) и не вибрирует, при падении угол наблюдения уменьшается, и мы проходим по графику справа налево, смещаясь последовательно от белого цвета к синему, зеленому, красному, который при 137° почти полно-

стью исчезает. Другая ситуация возникает при вибрации капли. На рис.7 вибрация приводит к периодическому смещению максимумов влево-вправо, как показано в верхней части графика с помощью синусоиды. (Амплитуда колебаний на рисунке составляет около 4.5° , что соответствует периодической деформации диаметра капли в горизонтальном сечении на 1.5%.) Из графика на рис.7 можно понять, что будет видеть наблюдатель, если посмотрит на такую каплю при различных углах рассеяния. Если угол наблюдения находится меньше 132° , то даже при макси-

мальном отклонении радуги вниз она не достигает этого угла, капля остается темной. При угле наблюдения 133° (см. рис.7) только начало красной радуги при отклонении на всю амплитуду вниз достигает этого угла и наблюдатель увидит короткие красные вспышки. Форма и цветность этих вспышек показана на рис.8,а. При совсем небольшом увеличении угла наблюдений — до 133.5° — уже весь красный максимум достигнет угла наблюдения и красная вспышка будет иметь максимальную амплитуду (рис.8,б). Если наблюдатель будет смотреть под все большим углом, он в конце концов увидит все максимумы радуги: сформируется яркий отрезок трека, края которого окрашены в цвета радуги, а средняя часть — в белый цвет, (рис.8,в). Чем больше угол наблюдения, тем длиннее яркий отрезок, а при угле выше 140° яркие отрезки сливаются, образуя сплошную линию, которая становится в основном белой с небольшой цветной модуляцией. Именно такую картину мы последовательно видим на фотографии рис.4, где нижняя часть трека 3 представляет собой короткую красную вспышку, а по мере увеличения высоты и угла наблюдений вспышки удлиняются и сливаются вместе в верхней части указанного трека. Отметим, что на эту картину накладывается некоторое смещение радуги за счет средней деформации капли во время падения. Регистрируя угловое положение последней вспышки и угол слияния вспышек в сплошной след, можно получить информацию и о средней форме капли, об амплитуде ее колебаний. Дополнительное использование стробоскопа позволяет точно определять частоту колебаний каждой капли, а по ней вычислять их объем и размер. Таким образом, из трека можно извлечь полные сведения о всех зарегистрированных каплях. Эта информация очень важна для физики осадков и для расчетов рассеяния радиоволн в дождях.

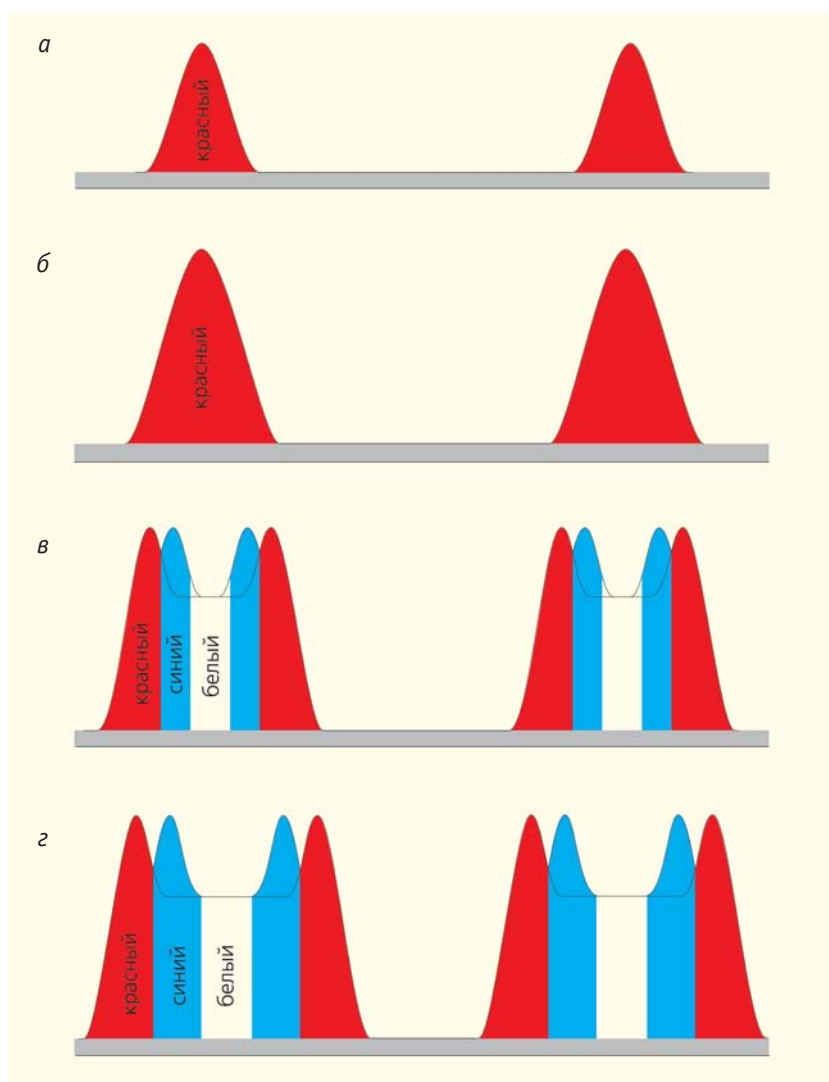


Рис.8. Изменение формы и окраски импульсов, которые формирует вибрирующая капля при увеличении угла наблюдений: $\Theta = 133^\circ$ (а), $\Theta = 133.5^\circ$ (б), $\Theta = 136^\circ$ (в), $\Theta = 138^\circ$ (г). Смещение по графику 7 слева направо.

Немного интриги

Однако «дьявол кроется в деталях». Далеко не все треки, зарегистрированные на фотографиях, имеют такую структуру. Многие, особенно крупные, капли формируют треки другой формы, давая яркую модуляцию выше радуги при углах $140\text{--}150^\circ$. Природа, как всегда, оказалась богаче тех простых моделей, которыми мы хотели бы ее описать. Дело в том, что расчет поведения радуг пока удалось выполнить только для капель, имеющих форму эллипсоида вращения [5]. В первом приближении то вытянутым, то сплюснутым эллипсоидом можно описать основную моду колебаний капль и среднюю деформацию капль во время падения в атмосфере. Но такое приближение не совсем точное. Чем крупнее капль дождя, тем сильнее ее средняя форма отличается от эллипсоида. Крупные капли, как показали исследования американских авторов [8], становятся плоскими снизу и округлыми сверху (рис.9). Как ведут себя радуги при такой форме капль, пока вычислить не удалось. Кроме того, у сплюсненной капль даже на основной частоте могут возбуждаться не только вертикальные моды колебаний, но и наклонные и горизонтальные моды, не говоря уж о второй и более высоких гармониках, которые показаны на рис.5. Самой сложной для расчетов становится ситуация, при которой у одной капль возникает целый набор различных мод колебаний. Поэтому загадочность простой капль воды раскрыта далеко не полностью и, по-видимому, нам открылась лишь небольшая часть ее красоты.

Впрочем, характер двойных треков на рис.1 можно объяснить довольно просто. Как мы уже отмечали, при рассеянии света на капле из нее выходят не один, а несколько лучей, которые мы называем производными лучами. На рис.9 показаны три вида таких лучей, распрост-

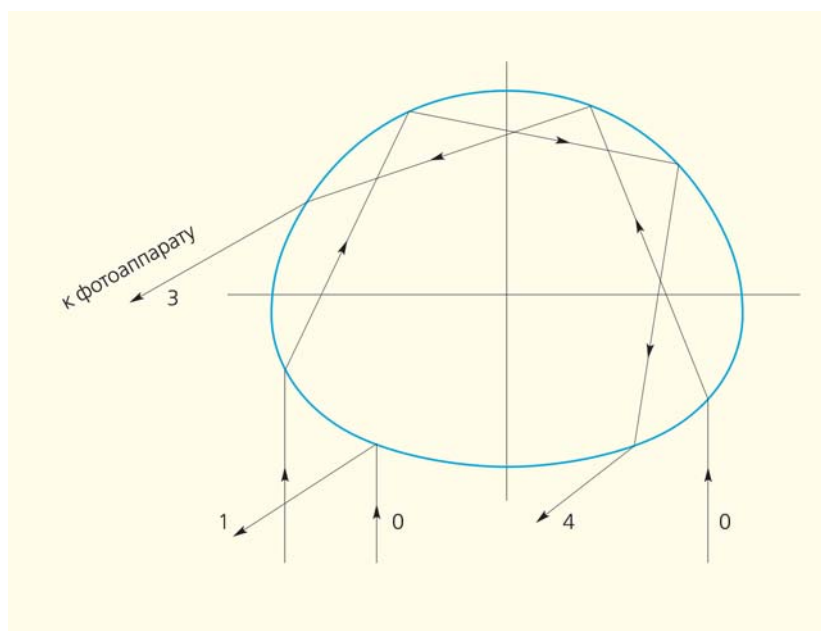


Рис.9. Форма падающих капль диаметром более 1.5 мм отличается от сферической. К наблюдателю одновременно распространяются несколько производных лучей, претерпевших отражение и преломление внутри капль. Луч 3 формирует радугу первого порядка, а луч 4 — второго.

раняющихся от капль к наблюдателю при вертикальной подсветке снизу. При вертикальном падении и подсветке снизу вверх следы от всех выходящих лучей накладываются друг на друга, создавая единый трек. Другая ситуация возникает при боковом движении капль. При этом треки от разных частей капль разделяются в пространстве, создавая двойной или тройной мультитрек [8]. В настоящее время мы не способны полностью расшифровать картину осцилляций капль на рис.1, можем только указать частоты колебаний и размеры капль. Возможно, более полные лабораторные эксперименты и расчеты позволят решить эту задачу.

На первый взгляд проведенные исследования могут показаться любопытными, но не очень востребованными. Но это не совсем так. Прежде всего, средняя форма и вибрация капль — определяющий фактор для работы поляризационных радаров в метеорологии. Без этих данных нельзя распозна-

вать опасные явления, град, угрозу обледенения самолетов, прогнозировать осадки. Более того, вибрация капль регистрируется дистанционно — по модуляции рассеянного излучения. Поскольку частота вибрации зависит от размера частиц, по спектру модуляции можно на расстоянии определять микроструктуру дождей, что увеличивает точность метеорологических измерений в радарной метеорологии.

Отметим интересные особенности любимых с детства радуг, которые прямо связаны с описанными в настоящей статье свойствами дождевых капль. Во-первых, во время дождя, даже если есть солнце, радуги почти не видно, а красивые дуги обычно наблюдаются после дождя. Это связано с тем, что крупные капли размывают радугу как за счет вибрации, так и за счет смещения угла радуги при их средней деформации (см. рис.2). Лишь сферические мелкие капли, которые еще не успели упасть на землю после дождя, дают красочные радуги.



Рис.10. Радуги наиболее ярки у самой земли. Чем выше дуга, тем сильнее размываются цвета у радуги. В левой части снимка можно заметить и радугу второго порядка. (Фотография любезно предоставлена сотрудником нашего университета В.Матвеевым.)

Во-вторых, радуга не одинаково красочна в различных ее частях. На фотографии рис.10 отчетливо видно, что самая яркая и четкая радуга наблюдается у самой земли, а чем выше ее дуга, тем сильнее размытие цветов. Данное свойство обусловлено тем, что верхняя часть радуги формируется вертикальным сечением капель, а в этом сечении наблюдается самое большое отклонение от окружности. Чем ближе капли к земле,

тем более округлым становится сечение капель, в котором образуется радуга, и тем меньше ее угловое смещение и размытие. Идеально четкие радуги у земли будут наблюдаться при почти горизонтальном положении солнца, однако в этом случае начинает сказываться изменение цвета светила при закате или восходе. При закатном солнце преобладают красные цвета, и четкость синего цвета в радуге уменьшается.

В заключение можно предложить читателям самим провести небольшой эксперимент по регистрации вибрации капель и наблюдению аномально высокой модуляции рассеянного света. Для этого можно даже не выходить из дома. Нужно включить душ, выключить в ванной свет и подсветить падающие капли фонариком либо сверху, либо снизу. Наблюдать вспышки капель следует под углом 30–60°, глядя вслед лучу. ■

Литература

1. *Стерлядкин В.В.* Натурные измерения колебаний капель осадков // Известия АН СССР. Сер. Физ. атм. и океана. 1988. Т.24. №6. С.613–621.
2. *Стерлядкин В.В.* Неожиданные свойства дождевых капель // Природа. 1989. №3. С.64–65.
3. *Рэлей Дж.* Теория звука. М., 1944. Т.2. С.369–365.
4. *Стерлядкин В.В.* Измерение резонансных свойств вибрирующих капель // Известия АН СССР. Сер. Физ. атм. и океана. 1982. Т.18. №1. С.98–101.
5. *Стерлядкин В.В.* Индикатрисы рассеяния эллипсоидальных капель воды // Оптика и спектроскопия. 1990. Т.69. Вып.6. С.1357–1362.
6. *Beard K.V., Brongi V.N., Thurai M.* A new understanding of raindrop shape // Atmospheric Research. 2010. V.97. №4. P.396–415.
7. *Стерлядкин В.В.* Рассеяние света дождевыми каплями // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т.13. №5. С.534–538.
8. *Стерлядкин В.В.* Регистрация треков аномально высокой модуляции света в дождях // Оптика атмосферы и океана. В печати.