

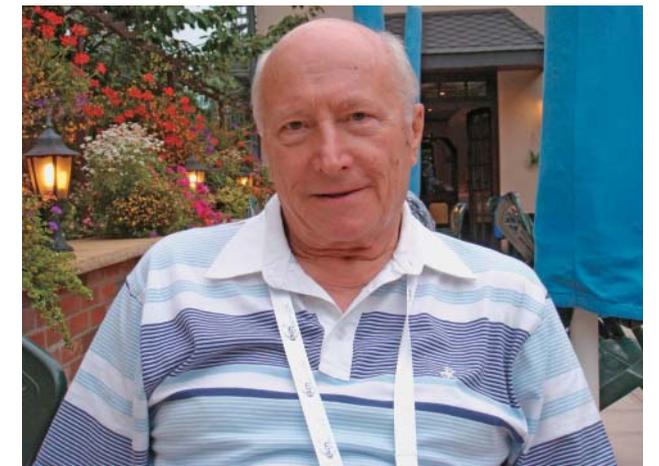


Светлые тени

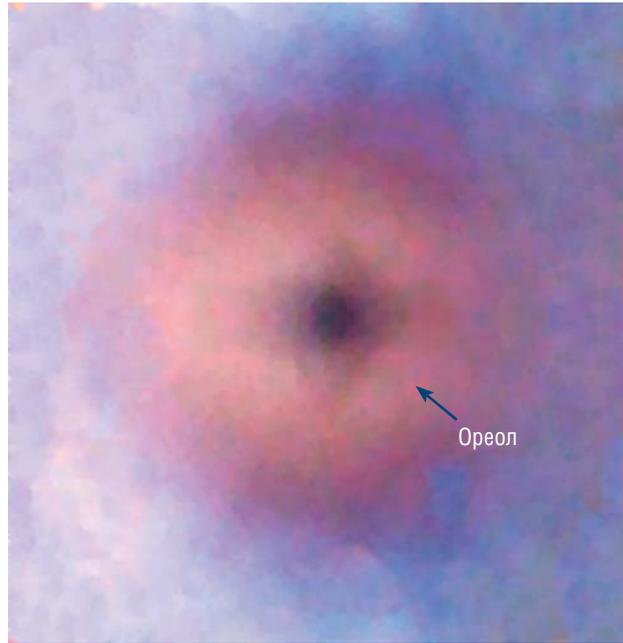
Ключевые слова: рассеяние света, радуга, дифракция, gloria.
Key words: light scattering, rainbow, diffraction, gloria

Многие научные статьи изобилуют формулами, которыми авторы иногда неоправданно усложняют свой текст, хотя бывает полезно сначала объяснить простыми словами, в чем состоит идея публикации. Кстати, А. Эйнштейн утверждал, что нет такой физической идеи, которую нельзя было бы объяснить без формул (впрочем, именно его некоторые идеи без формул понять трудно). В предлагаемой статье тени и свет, свойства которых так привычны и, казалось бы, понятны каждому с детства, предстают сложнейшим (но объясняемым без формул) физическим явлением, а иллюстрацией их необычности оказываются тени самолетов на облаках и их ореолы

Прямолинейность распространения света ученым античности представлялась очевидной. Эмпедокл (V в. до н.э.) и Евклид (III в. до н.э.) описывали оптические явления, включая прямолинейность и даже преломление лучей света. Но античные философы не могли даже отдаленно представить себе сложность задачи, за которую так отважно взялись. Некоторые проблемы рассеяния света материальными телами аналитически не решены до сих пор, хотя построены великолепные, но весьма сложные теории. Фундаментальный труд «Основы оптики» Нобелевского лауреата М. Борна и Э. Вольфа, изданный в 1968 г. и переведенный на русский язык в 1973 г., содержит 700 страниц, обильно усеянных сложнейшими формулами. Неспециалисту здесь делать нечего, но объяснить особенности рассеяния света, не прибегая к анализу, трудно. Возвращаясь к прямолинейному лучу света, можно напомнить, что он распространяется прямолинейно лишь в вакууме, не возмущенном гравитацией массивных объектов, или в однородной среде. Но если среда неоднородна, луч отклоняется в сторону большей плотности. Таких подробностей наши предки не знали, но могли заподозрить это в любые времена, любясь сплюснутым диском Солнца на восходе и закате. Только в XVII в., благодаря новым теоретическим и экспериментальным работам Р. Декарта, Г. Галилея и других ученых началось стремительное развитие геометрической оптики. Много важнейших работ было выполнено в XVII—XVIII вв., а более современное развитие геометрическая оптика получила в XIX и начале XX вв.



КСАНФОМАЛИТИ Леонид Васильевич – доктор физико-математических наук, Заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Института космических исследований РАН (Москва). Автор 17 космических экспериментов по исследованиям Венеры, Марса и кометы Галлея. Автор около 360 научных и научно-популярных публикаций



В ясный день тень от удаленного предмета окружена ярким ореолом. Тень самолета сильно размыта и лишь угадывается, но ореол виден хорошо. Он возникает благодаря дифракции света на объекте, размеры которого намного больше длины волны света. Снимок сделан с высоты около 10 км, высота верхней границы облаков, на которых видны ореол и тень, около 3—4 км

Однако с укреплением позиций волновой теории и развитием математических методов анализа все более очевидной становилась крайняя сложность процессов рассеяния света на малых и больших препятствиях.

Ореол вокруг тени

Одним из первых, кто понял, как устроен край тени, образующейся при падении света на границу плоскости, стал выдающийся немецкий физик Г. Кирхгофф. Он исходил из представлений о свете как об электромагнитных колебаниях крайне высокой частоты. Кирхгофф установил, что переход на краю тени, в очень узкой зоне, происходит плавно, да еще и с затухающими периодическими колебаниями.

Впрочем, к процессу образования тени ученые обратились задолго до Кирхгоффа. В начале XIX в. А. Френель рассматривал явление дифракции – небольшие отклонения от прямолинейности луча. Последователями, на основе его теории, было предсказано поразительное

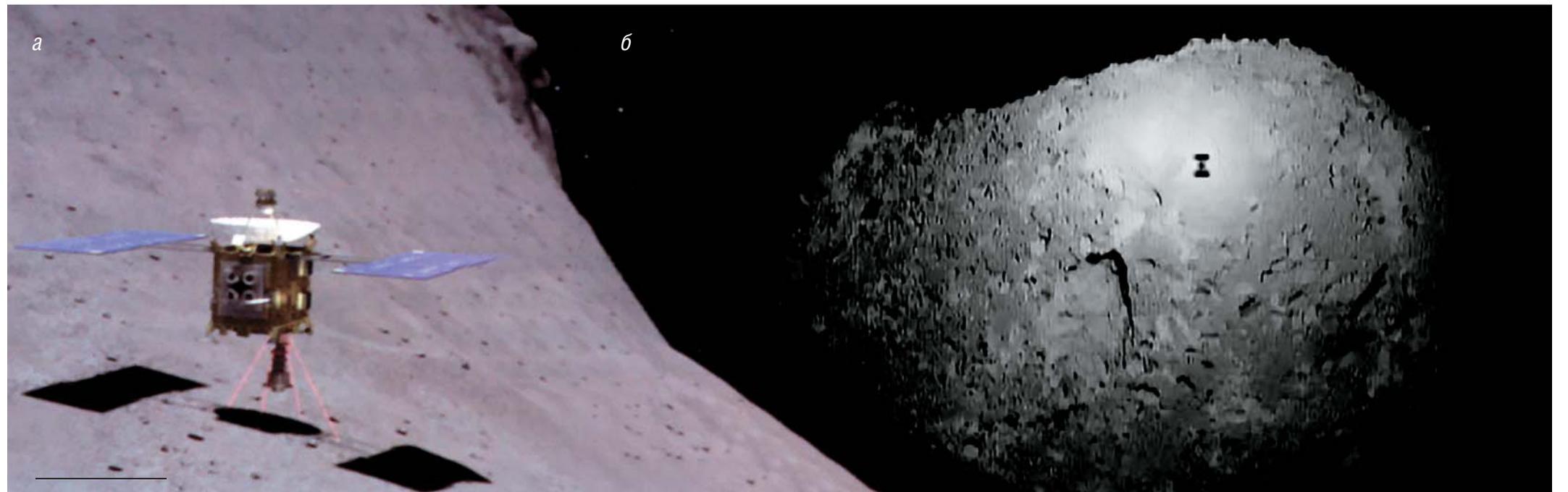
явление, которое затем экспериментально подтвердил Д. Араго: вокруг удаленной тени от крупного предмета появляется светлое пятно. Пятно плавно ослабевает от центра, окружая тень ярким ореолом. Например, яркий ореол появляется вокруг скользящей по земле тени от высоко летящего воздушного шара.

Вот только заметить его гораздо легче из гондолы воздушного шара, чем с земли. Или с самолета: в солнечную погоду тень самолета постоянно окружена ярким ореолом, который хорошо заметен на облаках, особенно когда самолет летит еще не слишком высоко. Наиболее наблюдательные авиапутешественники часто любят этим зрелищем. Впрочем, при благоприятных атмосферных условиях ореол, окружающий тень, можно увидеть и с высоты около 10 км, где обычно проходят трассы воздушных судов.

Рассеяние света в атмосфере – это то, что происходит вокруг нас постоянно. Мельчайшие капли воды в облаках, в тумане, снежинки и пы-



Тень самолета на облаках и окружающий ее ореол, который вызван дифракцией света на крупном объекте. Происхождение цветных колец имеет другую природу. Контраст деталей подчеркнут при обработке снимка. Снимок сделан с меньшей высоты, чем фото на стр. 56 (слева)



На снимках астероида Итокава (б) видна тень от исследовательского космического аппарата «Хаябуса» (а), с которого и были сделаны снимки. Тень окружена небольшим светлым ореолом, образованным в результате дифракции солнечных лучей. Происхождение прилегающих светлых пятен обусловлено другим эффектом – астрономическим эффектом оппозиции. Высота аппарата над поверхностью около 3 км. Фото японского космического агентства JAXA

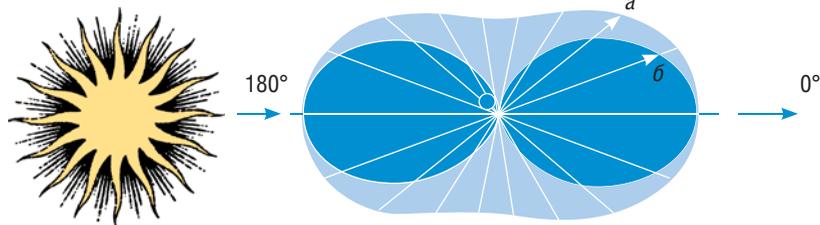
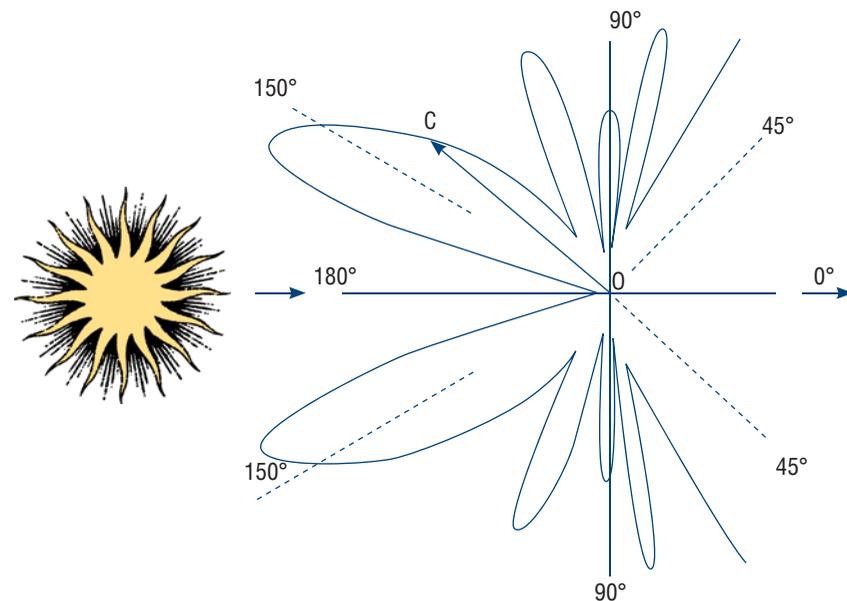


Диаграмма рассеяния света на частицах, много меньших длины волны. Длина лучей на индикатрисе представляет интенсивность луча, рассеянного под соответствующим углом. При рассеянии света на сферической частице меньшей длины волны диаграмма имеет форму овала в случае неполяризованного (а) или «восьмерки» для поляризованного (б) света

Рассеяние монохроматического поляризованного света на сферической диэлектрической частице с длиной окружности по экватору, равной восьми световым длинам волн, происходит главным образом вперед (эта правая часть диаграммы на рисунке не показана). Обратное к источнику свет почти не отражается. Луч ОС – интенсивность света, отраженного под определенным углом (в данном случае, 140°) к направлению излучения. Подобное рассеяние хорошо знакомо каждому: пылающие закаты – это излучение, рассеянное вперед, к наблюдателю



Рассеяние света на препятствиях – это отклонение прямого пучка лучей под разными углами от первоначального направления. Угловую диаграмму распределения интенсивности рассеянных лучей называют индикатрисой рассеяния. Наличие многочисленных максимумов (лепестков) диаграммы указывает на сложный характер рассеяния

линки (все это «аэрозоли») рассеивают свет. В начале XX в. немецкий физик Г. Ми разработал подробную теорию взаимодействия света с мелкими сферическими частицами (например, с жидкими каплями). Оказалось, что с уменьшением размера капель характер взаимодействия с ними света резко изменяется, когда длина окружности сферической частицы становится равной длине волны света. Результат зависит от прозрачности или непрозрачности частицы, ее электрических свойств (проводимости) и показателя преломления среды. Кроме Ми, еще несколько авторов в XX в. в своем анализе пришли к тем же выводам и даже написали книги похожего содержания. Трудности возникали (и сохраняются) с анализом рассеяния света мелкими несферическими частицами. Что же касается ореола, результата взаимодействия света с крупными предметами, размеры которых намного больше длины волны света, теория указала на удивительное, парадоксальное явление: ослабление света производит площадь, которая ровно вдвое больше реального геометрического поперечного сечения большого предмета, создающего тень (например,



Красочность закатов определяется сложным характером диаграммы рассеяния света, которое возникает на атмосферных неоднородностях

самолета). Казалось бы, какая может быть дифракция на таком огромном предмете? Но именно дифракция света ответственна за появление ореола вокруг тени воздушного шара или самолета. Вблизи края геометрической тени есть узкая область, где приближения, на которых основана геометрическая оптика, становятся некорректными. Так теория объясняет и удвоение поглощающей и отражающей площади, и появление светлого ореола.

Ореолы вокруг тени наблюдаются и с космических аппаратов. Небольшой астероид Итокава, размерами всего $535 \times 294 \times 209$ м, был целью японской космической миссии «Хаябуса» в 2005 г. Когда 10 ноября 2005 г. аппарат постепенно сближался с астероидом, были сделаны снимки, на которых хорошо заметен небольшой ореол вокруг тени. В этой точке Солнце находилось точно за аппаратом. Но гораздо больший примыкающий светлый район имел отношение не к аппарату «Хаябуса», а к самому Солнцу. Это так называемый эффект оппозиции, когда лучи Солнца заглядывают в

бесчисленные мелкие углубления на неровной поверхности небесного тела и освещают их дно и склоны, а наблюдатель смотрит со стороны Солнца. Каждый знает, как многократно возрастает яркость Луны во время полнолуния, когда Земля оказывается на линии Солнце – Луна. Это и есть эффект оппозиции. Но вернемся к снимкам с самолета.

Цветные кольца

Если авиапутешественнику повезет, он может увидеть еще более интересное явление, когда тень самолета не только окружена ореолом, но и охвачена цветным кольцом, и даже не одним. Чтобы объяснить происхождение таких колец, можно попытаться снова обратиться к теории рассеяния света мелкими частицами, хотя, как будет показано ниже, причина все-таки заключается в другом.

Как уже упоминалось, сам процесс рассеяния света зависит не только от размеров и природы частиц, дли-



ны волны падающего света, но и от других его свойств, например поляризации. В простейшем случае, если частицы очень мелкие, направления преимущественного рассеяния света образуют, в зависимости от его поляризации, восьмерку или овал, количество света, рассеянного вперед по направлению луча и назад, одинаково. Но если частицы – более крупные диэлектрические шарики диаметром около 0,1 мкм, с длиной окружности по экватору, составляющей, например, восемь длин волн, диаграмма рассеяния (которую называют индикатрисой) выглядит иначе: подавляющая часть падающего света рассеивается вперед. Если наблюдатель будет перемещаться в плоскости диаграммы, он увидит чередующиеся всплески и уменьшения яркости. То же самое происходит при рассеянии солнечного света на атмосферных аэрозолях. Форма индикатрисы зависит от длины волны, а лучи Солнца на закате (и восходе) проходят сквозь множе-

ство локальных неоднородностей атмосферы, поэтому часто утром или вечером небо так ярко и неоднородно окрашено. Каждая неоднородность «отвечает» своей диаграммой, своими «лепестками», выделяя тот или иной цвет и яркость. Многочисленные максимумы и минимумы распределения интенсивности рассеянных лучей по углам отклонения показывают, как сложен характер рассеяния. На крупных частицах обратно к источнику свет почти не отражается. Зато рассеяние падающего излучения вперед хорошо знакомо каждому: пылающие закаты – это излучение, рассеянное вперед, к наблюдателю.

Если изменять длину волны (цвет излучения) или размеры и физические свойства частиц, лепестки диаграммы рассеяния будут сходиться или расходиться, увеличиваться или уменьшаться. И наоборот, сами атмосферные неоднородности воздействуют на проходящее солнечное излучение, в котором присутствует



Темное пятнышко в центре – тень самолета на облаках на фоне окружающего ее ореола, как на фотографии выше (стр. 56, слева вверху). Радужные кольца возникли благодаря рассеянию света на аэрозоле облаков при полном внутреннем отражении. Контраст деталей подчеркнут. Снимки сделаны с большой высоты

весь набор длин волн, воспринимаемых человеческим глазом и управляют, таким образом, красочными небесными декорациями.

Но объяснить свойствами индикатрисы появление цветных колец вокруг теней и ореола, при любых разумных размерах частиц, не удастся, хотя снимки несомненно указывают на связь колец с физическими свойствами аэрозоля облаков. В разрывах или разрежениях облаков кольца не видны. Обращает на себя внимание их высокая яркость: они ясно видны на фоне облаков, ярко освещенных Солнцем. Именно

радужная окраска колец, их удивительная яркость и присутствие второго, внешнего кольца, подсказывают природу и происхождение цветных колец – это радуги, но несколько отличающиеся от обычных приземных. Известно, что к появлению радуги приводит сложная комбинация эффектов линзы и призмы при полном внутреннем отражении света в капле влаги облаков. Эффект зависит от углов, под которыми излучение падает на каплю, отражается и выходит из нее, а также от числа отражений света внутри капли.



На снимке, сделанном М. Мингалиевым в горах Кавказа, вокруг тени фотографа видны радужные кольца глории и ореол вокруг тени его головы, хотя и не очень яркий из-за сравнительно небольшого расстояния от объекта до тени. Радужные кольца имеют высокую яркость даже по сравнению со скалой, освещенной прямым светом. Наверное, еще лет 200 назад такой нимб стал бы верным признаком святости М. Мингалиева.
Фото М. Мингалиева

Радуги и глории

Обычная, классическая радуга возникает под углом около 138° . Если отражений несколько, появляются вторичные радуги. Радужно окрашенные кольца отличаются от приземных радуг тем, что отраженные и преломленные лучи собираются и как бы фокусируются в узком конусе вблизи 180° , направленном обратно, к Солнцу. Этим объясняется высокая яркость радужного кольца, сравнимая с прямым солнечным освещением. В метеорологии такое кольцо называют глорией (иногда глориями называют вторичные приземные радуги). Второе кольцо глории также различимо на фотографиях. Таким образом, то, что видно на снимках, – это совмещенные эффекты двух совершенно разных явлений: результата взаимодействия света с крупным объектом, размеры которого намного больше длины волны света, и радуги (глории). А их пространственная совмещенность вполне естественно объясняется тем, что все возникающие углы откладываются от направления на Солнце, которое совпадает с направлением на самолет, если, конечно, смотреть из центра глории. Интересно, что видимые (угловые) размеры тени самолета и ореола зависят от высоты полета и уменьшаются с высотой, а размеры глории – нет.

Ореол с самолета виден часто. Чтобы возник ореол, расстояние до поверхности, на которой видна тень, должно быть достаточно большим. А для возникновения глории нужно, кроме того, сочетание целого ряда условий, зависящих от физических свойств рассеивающей среды (мелких капель воды), их размеров, температуры и концентрации (плотности облаков или тумана). А главное – Солнце должно быть прямо за спиной у наблюдателя. Поэтому кресло у окна в само-

лете, летящего в дневное время в чистом небе высоко над плотными облаками – самое подходящее место для фотографирования глории.

И все же иногда удается видеть подобное явление без всяких самолетов. Солнце за спиной у наблюдателя, при других необходимых условиях, чаще всего можно встретить в горах, при низком Солнце, на восходе или закате.

В сентябре 2010 г. группа участников конференции в Нижнем Архызе (обсерватория САО РАН, северный Кавказ) отправилась на экскурсию в горы. За их спиной было ясное небо с низким Солнцем, а впереди, как это часто бывает в горах, поднималась полоса плотного тумана. Доктор физ.-мат. наук М. Г. Мингалиев выполнял обязанности экскурсовода, но вместе с тем не расставался с фотокамерой. Когда вокруг его тени вдруг появилось кольцо глории, он не упустил возможность создать автопортрет с нимбом. Наверное, лет 200 назад нимб стал бы верным признаком святости М. Г. Мингалиева. А может быть, принес бы ему какие-нибудь неприятности.

На снимке хорошо видны радужные кольца глории. Ореол вокруг тени головы хотя и заметен, но он не очень яркий из-за сравнительно небольшого расстояния до тени. Радужные кольца имеют высокую яркость даже по сравнению со скалой справа на снимке, освещенной прямым светом Солнца (как и на снимках с самолета).

Конечно, такие необычные условия встречаются очень редко, но на всякий случай берите с собой фотокамеру, когда идете в горы.

Литература

М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М.: Наука, 1979. С. 15–23.

Причины Всех Вещей // В мире науки. 2009. № 11, С. 50.

В публикации использованы фото автора