

М. А. МОГИЛЕВСКИЙ

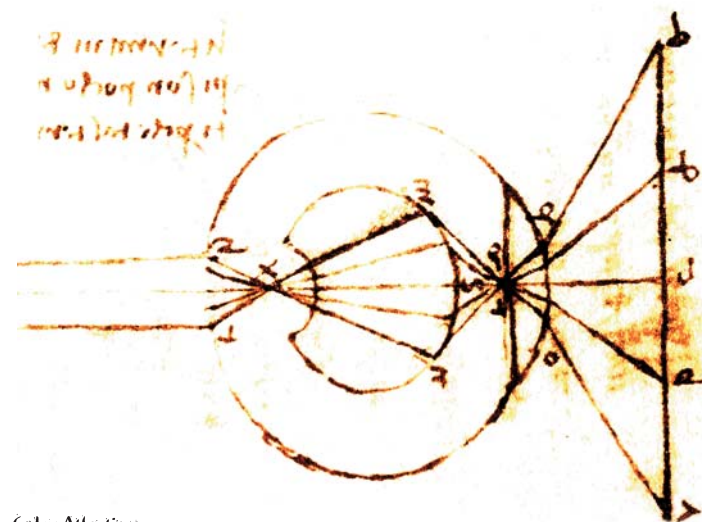
ОПТИКА ОТ ЛЕОНАРДО

По «анкетным данным» Леонардо да Винчи был ремесленником без университетского образования, но смог получить научные результаты высочайшего уровня во многих областях науки благодаря разработке очень эффективного научного метода



МОГИЛЕВСКИЙ Михаил Алексеевич — доктор физико-математических наук, профессор, более 30 лет преподавал физику в новосибирской Физико-математической школе. Специалист по механизмам деформации металлов и автор патента по производству литой дамасской стали

*«Глаз является родоначальником астрономии... именно он дает советы всем человеческим искусствам... он — государь математических наук, его науки — достовернейшие. Он измерил высоту и величину светил... породил архитектуру, перспективу и божественную живопись. О превосходнейшее из всех творений Бога! ...Глаз — окно тела человека, через которое он глядит на свой путь и наслаждается красотой мира, без него эта человеческая темница — пытка... Он превзошел Природу, ибо простые природные возможности ограничены, а труды, которые глаз предписывает рукам, — бесчисленны.»**



Codex Atlanticus

«По необходимости все изображения объектов, находящиеся перед глазом, пересекаются в двух плоскостях. Первое из пересечений происходит в зрачке, второе в линзе хрусталика... Никакое изображение, даже самого малого объекта, при входе в глаз не может не стать перевернутым; но при дальнейшем прохождении через линзу хрусталика оно переворачивается еще раз и принимает то положение, которое имел объект перед глазом»

* Все тексты, выделенные курсивом, принадлежат перу Леонардо да Винчи

Восторженными словами выражает свое отношение Леонардо да Винчи к глазу — главному инструменту художника и ученого. Три особенности «окна души» и связанные с ними проблемы представляли для него наибольший интерес: анатомия глаза и механизм зрения; природные оптические эффекты и еще одна, более специальная проблема — как наилучшим образом выразить все разнообразие наблюдаемой природы на плоской картине.

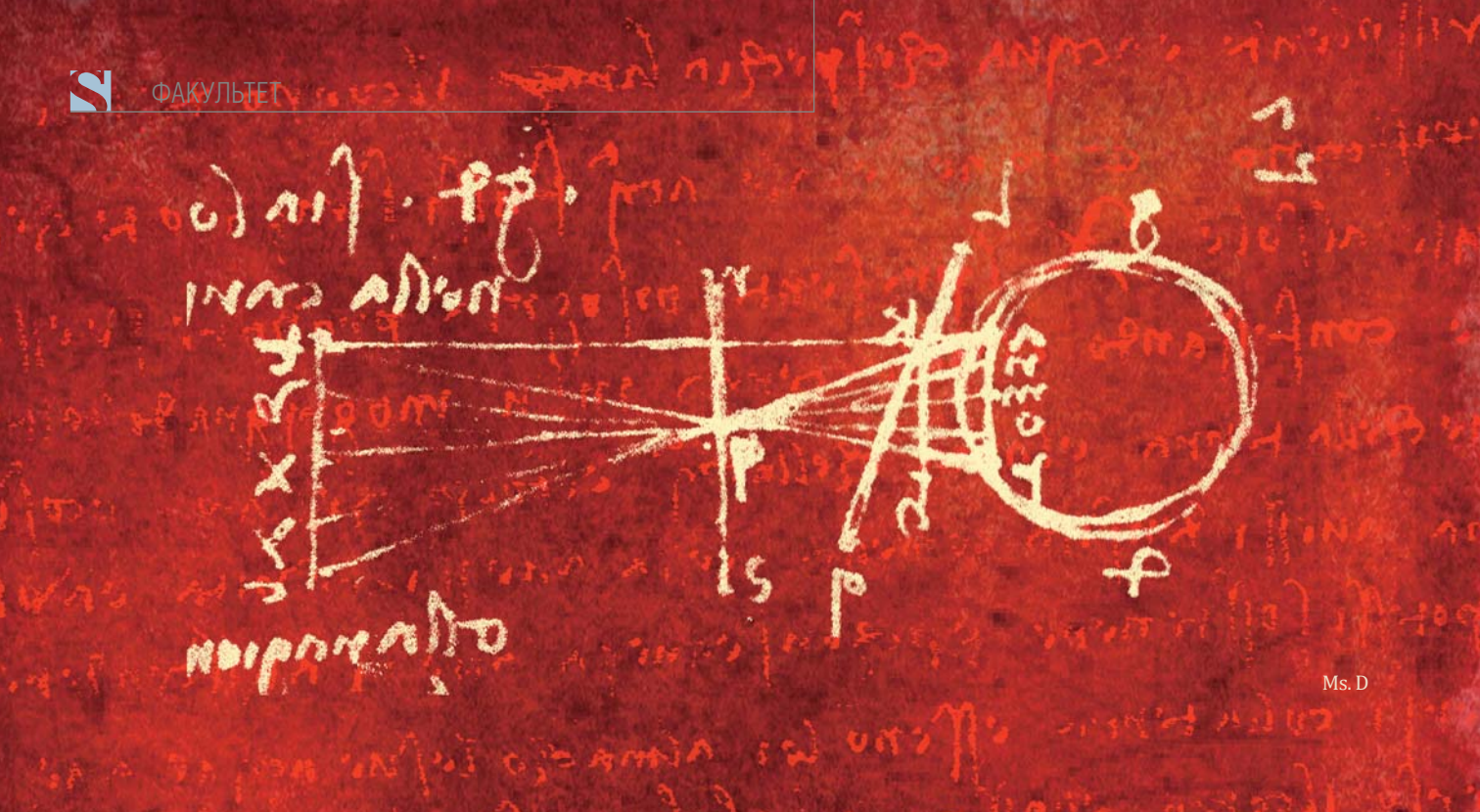
Сегодня мы представляем краткий обзор работ Леонардо в разных разделах оптики — «достовернейшей» науки об эффектах в природе, воспринимаемых благодаря глазу. Несомненно, будет интересно и поучительно для читателей проследить путь, которым шел от постановки проблемы к фундаментальному выводу этот величайший гений в истории человечества.

О механизмах видения

В полушаге от открытия

Пытаясь понять механизм зрения, Леонардо отверг восходящее к Платону представление о том, что из глаза исходят лучи, «ощупывающие» изучаемый объект. Его аргумент против был по-своему прост и убедителен: если посмотреть ночью на звездное небо, то сразу станет ясно, что лучи из глаза не могут охватить все это множество звезд.

Но дальнейший ход исследования оказался тяжел и долог. Как и всегда, Леонардо начал работу с изучения строения изучаемого объекта: «Напиши в своей «Анатомии», в каком отношении стоят друг к другу все сферы глаза и на каком расстоянии от них находится сфера хрусталика». Поскольку при надрезании оболочки глаза его содержимое вытекает, Леонардо использовал оригинальный метод,



Ms. D

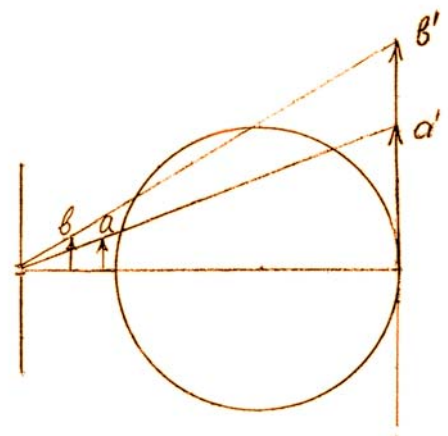
чтобы обойти это препятствие: «При анатомировании глаза, для того чтобы хорошо разглядеть что внутри, не проливая его влаги, надобно положить глаз в яичный белок, прокипятить и укрепить, разрезая яйцо и глаз поперек, дабы из средней части ничего не вылилось».

К сожалению, в данном случае изобретательность подвела автора. Различие в структуре частей глаза приводит к тому, что хрусталик, представляющий в живом глазу двояковыпуклую линзу, при нагревании превращается практически в шар. Более того, он отходит от роговой оболочки и смещается к центру глаза. Поэтому согласно схеме хода лучей в глазу, предложенной Леонардо, в нем формируется прямое изображение, а не перевернутое, как должно быть в собирающей линзе.

Для проверки своей схемы построения изображения в глазу он предполагал также изготовить большую стеклянную модель глаза с полостью для головы наблюдателя. Кроме того, для этих целей он придумал оригинальный опыт с иголкой, расположенной между глазом и экраном с отверстием.

Рекомендую повторить этот простой и красивый эксперимент, но не с острой иглой, а с портновской булавкой с ушком. Что при этом реально произойдет? Свет, проходящий через малое отверстие в экране, создаст в глазу тень булавки (не просто некий «образ!»), что легко проверить, приклеив на отверстие в булавке кусочек кальки, наполовину закрашенной чернилами. Тень можно получить и на листе бумаги, если установить его на место глаза, и тень при этом будет не перевернутая! Какой же вывод следует из этого эксперимента? Свет, идущий из отверстия, создает на задней поверхности глаза тень, притом прямую, но «чувствилище» (на

Схема опыта с иглой между глазом и экраном с отверстием:
 «Пусть большой иглой будет сделано в куске картона отверстие, величиною примерно в просыное зерно, и этот картон поставлен против зрачка глаза на расстоянии трети или четверти локтя. Через это отверстие смотри на воздух. Далее помести иглу или соломинку между зрачком глаза и отверстием в картоне. Двигай эту иглу вниз и вверх, вправо и влево, навстречу твоему зрачку, и ты ясно увидишь в воздухе, что по ту сторону такого отверстия образ этой иглы совершает все движения в направлениях, противоположных тем, что ты производишь...»



Тень от иглы в опыте, предложенном Леонардо для проверки схемы построения изображения. а и б — положения объекта на разных расстояниях перед зрачком, а' и б' — его изображения на сетчатке



Codex Atlanticus

Леонардо эмпирическим путем установил, как правильно применять собирающие и рассеивающие линзы для коррекции зрения. Он изготавливал линзы как сплошные, так и из двух тонких стекол с водой между ними, при этом подбор очков осуществлялся не по фокусному расстоянию, а в соответствии с возрастом человека

современном языке — зрительный аппарат мозга) по привычке переворачивает это изображение!

Предложив схему опыта с объектом, перемещающимся перед малым отверстием в экране, установленном перед глазом, Леонардо да Винчи по сути был всего лишь в полшаге от открытия механизма видения. Но, к сожалению, он не смог правильно объяснить свои наблюдения, и открытие было сделано одним из творцов небесной механики И. Кеплером в начале XVII в.

Тайна Джоконды: 2 в 1

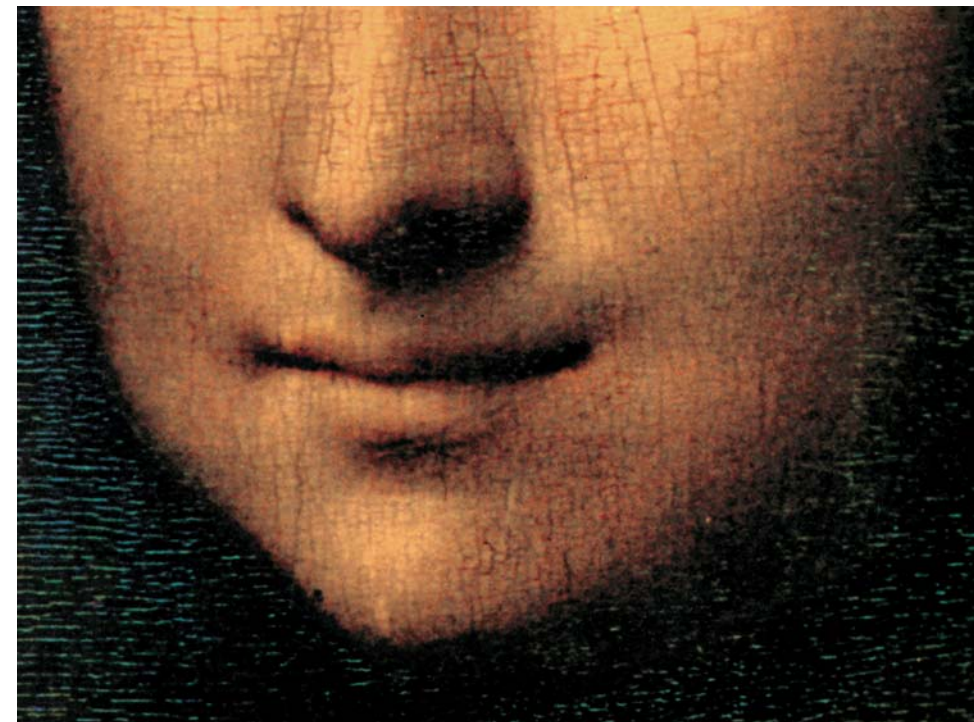
По-видимому, именно Леонардо впервые обратил внимание на эффект, связанный с восприятием быстротекущих изменений в объекте, — сохранение изображения в течение некоторого времени:

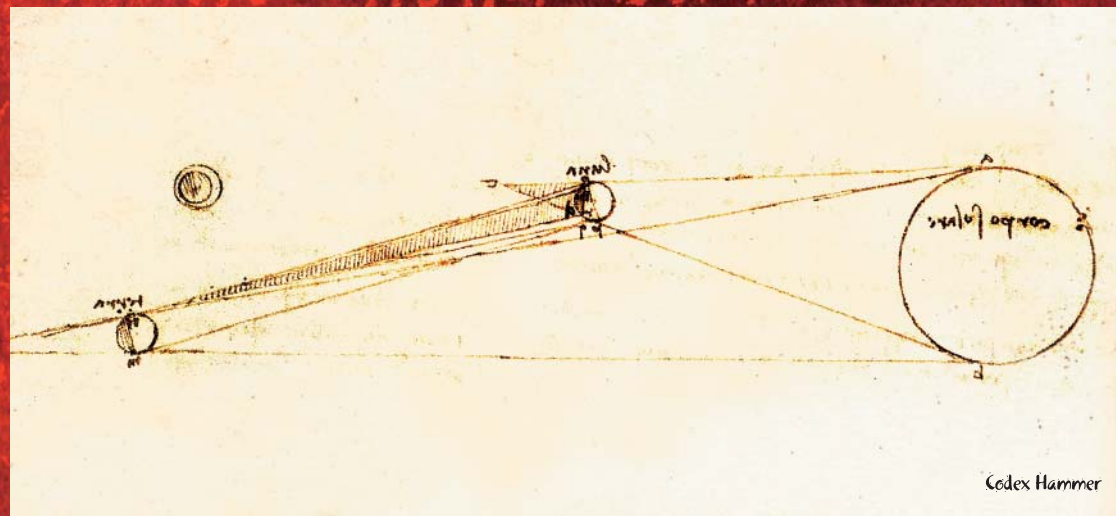
«Сияние света или другого светящегося тела остается в глазу в течение некоторого времени после того, как ты на него смотрел; движение маленькой головешки, быстро вращаемой по кругу, кажет-

ся непрерывным и однородным огнем, а движение капель дождя воспринимается как непрерывные нити, ниспадающие из туч».

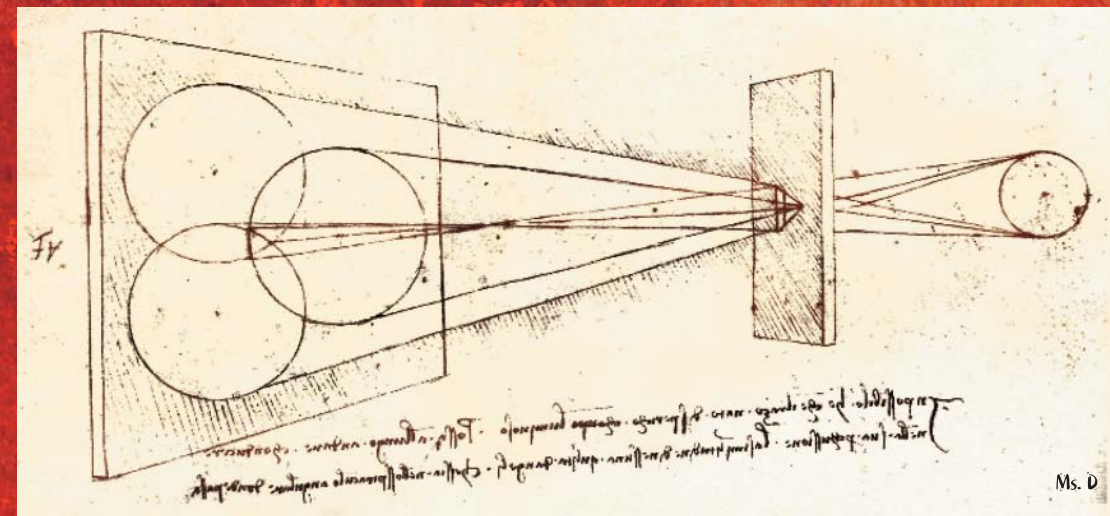
Сущность этого феномена, заключающегося в изменениях в активном элементе фоторецепторов под воздействием света, была выяснена сравнительно недавно. Эффект задержки зрительного восприятия лежит в основе столь привычных для нас кино и телевидения. И именно задержкой зрительного восприятия объясняется один из секретов Леонардо — завораживающая улыбка Джоконды, волновавшая зрителей в течение пяти веков.

Так в чем же заключается тайна Джоконды? Ответ был получен на основании анализа последовательных кадров киносъемки человека, внимательно рассматривающего картину: если в первый момент взгляд был направлен на правую половину рта, то затем он перемещался вверх на нос, глаза, лоб, и заканчивалось обследование на левой половине рта. Левая половина рта





Леонардо впервые правильно объяснил происхождение пепельного цвета поверхности Луны, не освещенной Солнцем: темную сторону Луны подсвечивает поток солнечного света, отраженный от Земли



Джоконды улыбается, правая — выражает состояние сосредоточенного внимания. И поскольку взгляд смотрящего не сразу схватывает всю картину, а последовательно обегает ее, то благодаря задержке восприятия к концу осмотра возникает парадоксальная ситуация — глаз как бы видит отображение на лице одновременно различных состояний души.

Это объяснение таинственной полуулыбки Джоконды подкрепляется результатами недавнего компьютерного исследования, проведенного учеными из Нидерландов и США. Программа проанализировала основные черты лица, изгиб губ и морщинки вокруг глаз, а затем оценила лицо по шести главным группам эмоций. Согласно оценкам лицо Джоконды на 83% счастливое, на 9% — выражает чувство отвращения, на 6% — полное страха, и на 2% — злое.

Сенсационное открытие в истории искусств было сделано и в 1987 г. Искусствовед и специалист по компьютерной графике Л. Шварц показала, что при повороте Туринского автопортрета Леонардо на 90 градусов характерные парамет-

ры лица художника и Моны Лизы совпадают с высокой точностью. Может быть, чтобы создать портрет человека Ренессанса с его сложным духовным миром, Леонардо и использовал столь необычный прием — рисовал части портрета Джоконды со своего лица в разных эмоциональных состояниях?

О фотометрии

Свет и тень

Леонардо да Винчи можно назвать основателем фотометрии — раздела оптики, рассматривающего вопросы освещенности. В его записных книжках вопросам света и тени посвящено более сотни записей. Он изучал оптические эффекты, возникающие благодаря световому излучению от одного и нескольких источников и зависящие от положения последних относительно объекта и глаза; эффекты прямого и рассеянного света; цветные рефлексы и т. д.

Леонардо установил и основные законы фотометрии. Во-первых, это зависимость освещенности тела от угла падения света: «Свет, падающий на затененное тело под

самым острым углом, создает самую большую освещенность, а наиболее темной частью тела является та, которая получает свет под большим углом; и свет, и тень образуют пирамиды...».

Во-вторых — зависимость освещенности от расстояния до источника света. Леонардо вывел так называемый «пирамидальный закон», гласящий, что освещенность уменьшается обратно квадрату расстояния от источника света до объекта. Следует отметить, что подобную закономерность он применял при рассмотрении многих других процессов, в частности при описании перспективы, анализе ослабления звука с расстоянием, а также излучения тепла от горячего тела.

«Все наблюдаемые вещи приходят в глаз линиями пирамиды, и вершина пирамиды находится в середине зрачка...»

Читатель, возможно, наблюдал такой или схожий эффект, когда при отражении солнца от маленького осколка зеркала на стене получается круглое пятно. Подпись под рисунком Леонардо да Винчи гласит: «Лучи, рожденные на светящейся сфере, после прохождения через отверстие не могут сохранить форму этого отверстия, когда пройдут большое расстояние до экрана». Леонардо предлагал рассматривать фигурное отверстие как набор маленьких камер-обскур, за которыми на экране должны возникать круглые пятна — изображения от лучей, прошедших через углы. В области перекрытия кругов попадает больше света, поэтому они должны быть более яркими. Отсюда следует, что вокруг яркого пятна на экране должен быть слабо освещенный, но достаточно широкий ободок. Может быть, кто-нибудь проверит это предположение?

Об излучении, поглощении и рассеянии света

Тепло — суть лучей

«Солнце греет за счет своего естественного тепла» — Леонардо пришел к этому выводу, анализируя опыты по тепловому действию света. «Вогнутое зеркало, само будучи холодным, отражает лучи и получает тепло, горячее, чем от огня... Сферический сосуд, заполненный холодной водой, собирает падающие на него лучи и создает тепло, большее, чем от огня. Из этих двух экспериментов следует, что тепло является собственной сутью лучей, а не приходит от горячего зеркала или шара».

Из этих умозаключений следует вопрос фундаментального характера об источнике тепла, исходящего от Солнца. Говорят, что, сформулированная задача уже наполовину решена, но для получения окончательного ответа может понадобиться много времени и усилий. Реальный механизм источника тепла Солнца был понят лишь в начале XX в., после установления происходящих на нем ядерных превращений вещества.

Какое небо голубое...

Поразительно, но уже 500 лет назад Леонардо да Винчи сформулировал проблему происхождения цвета неба и прошел большую часть пути от простого любования к почти правильному пониманию природы этого явления.

«Я утверждаю, что синева неба есть не его собственный цвет, а порождается нагретой влагой, испаряющейся в виде мельчайших неощутимых частиц. Солнечные лучи ударяют по ним и заставляют светиться на фоне глубокой темноты, которая покрывает их сверху... И это можно увидеть, как видел я, если подняться на Монте Розу, вершину в Альпах... Если бы голубой цвет атмосферы был ее естественным цветом, отсюда следовало бы, что чем большая толщина атмосферы была бы между глазом и источником света, тем более плотной была бы голубизна, как это наблюдается в случае стекла или сапфира, которые тем темнее, чем толще. С атмосферой же происходит как раз наоборот, чем больше ее толщина, когда взгляд опускается к горизонту, тем она белее... Можно также отметить различие между пылин-

ками и частицами дыма в солнечных лучах, проходящих в темную комнату через малое отверстие: в одном случае луч кажется пепельным, а луч, проходящий через тонкий дым, кажется прекрасно синим».

Модель Леонардо в основе своей близка современным представлениям, согласно которым голубой цвет неба является результатом рассеяния солнечного света, представляющего собой электромагнитные волны, на флуктуациях плотности воздуха. При этом коротковолновая, синяя, часть спектра рассеивается значительно сильнее.

Красный сигнальный

Изучая особенности восприятия удаленных объектов, Леонардо выделил, помимо геометрической перспективы, еще две стороны проблемы, дав им специальные названия: перспектива цвета (как меняется видимый цвет объекта с увеличением расстояния до него) и перспектива отчетливости (почему границы удаленных объектов видны не столь резко, как близких).

Вот одно из наблюдений, важное для художника-пейзажиста: *«Различные цвета, которые сами по себе не голубые, будут на большом расстоянии казаться голубее, и цвета, наиболее далекие от черного, на большом расстоянии почти сохраняют свой цвет. Следовательно, зелень полей будет казаться более голубой, а желтый и белый меньше изменятся, чем зеленый, а красный еще меньше».*

Знает ли уважаемый читатель, что сигнальные огни автомобилей и светофоров окрашены в красный цвет именно из-за минимального рассеяния красных лучей в воздухе по сравнению с лучами других цветов из

видимой части спектра? Можно сказать, что это есть наиболее широко используемый результат научных исследований Леонардо да Винчи, конкурирующий лишь, по-видимому, с изобретенным им велосипедом.

Исследования Леонардо по второму направлению послужили научной основой сфумато, знаменитой техники живописи, также изобретенной великим художником.

О волновой природе света

«Когда волны гуляют по полю, колосья остаются на месте»

Краткая, в одну строку, запись из «Атлантического Кодекса» да Винчи — ключевое слово «волны» произнесено. Затем начинается длительное, предельно вдумчивое исследование сущности волнового движения в экспериментах на воде. Почти в полном соответствии с шуточной рекомендацией Козьмы Пруткина: «Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые; иначе такое бросание будет пустой забавой».

Леонардо обнаружил, что возмущения на воде от брошенных камней свободно, без заметных послед-



Cedex Hammer

«Если бросишь одновременно два камешка на некотором расстоянии в спокойную воду, то увидишь вокруг мест удара два множества кругов, которые расширяются, встречаются, проходят друг сквозь друга, причем центр каждого остается в точке удара. Причина состоит в том, что, несмотря на очевидность движения, вода не сдвигается со своего места, так как ямки, которые сделали в ней камни, тотчас же сомкнулись, и это возникшее от внезапного размыкания и замыкания воды движение производит в ней некоторое сотрясение, которое скорее можно назвать дрожанием, нежели движением. В подтверждение того, о чем я говорю, посмотри на соломинки, которые вследствие своей легкости находятся на поверхности воды, — они не смещаются волнами, проходящими под ними...»

Явление дисперсии — разложения солнечного света в спектр — Леонардо описал за двести лет до известных опытов Ньютона со стеклянной призмой



Codex Hammer

«Если ты поставишь стакан, доверху наполненный водой, на подоконник в затемненной комнате так, что солнечные лучи будут падать на него снаружи, то увидишь образование из солнечных лучей, прошедших через стакан, разноцветных полос на полу под окном. И поскольку глаз здесь не принимал участия, мы можем с уверенностью сказать, что возникновение этих цветных полос никоим образом не связано с глазом»

ствий, проникают друг через друга. Но ведь такого эффекта никогда не наблюдается при столкновениях твердых тел, водных и воздушных потоков! И Леонардо приходит к заключению, что обнаруженный эффект является характерной особенностью именно волнового движения.

Он формулирует вывод о волновой природе звука и света: «Хотя звуки, проникающие сквозь воздух, кругообразно расходятся от своей причины, круги, распространяющиеся от различных исходных точек, встречаются друг с другом без какой бы то ни было помехи и проходят один через другой, всегда сохраняя в качестве центра свою причину».

И далее: «В воде при ударе образуются круги вокруг точки удара; голос в воздухе создает то же на больших расстояниях; свет идет еще дальше». «Каждое тело наполняет окружающий воздух своими изображениями, и каждое изображение появляется полностью и со всеми своими частями. Воздух заполнен бесчисленным множеством лучей, которые пересекаются, не смещая друг друга, и которые воспроизводят, где бы их ни принимали, истинную форму своей причины».

Леонардо да Винчи за три столетия до открытия интерференции указал на общую природу таких явлений, как переливающиеся разными цветами перья птиц, радужные цвета на поверхности старых стекол и масляных пленках на поверхности воды

Стоит напомнить, что представление о волновой природе света было признано физиками лишь в XVIII в., после столетних споров. Драматическая история развития физической оптики является результатом особенностей взаимодействия света с веществом в зависимости от соотношения длины волны света и характерного размера объекта.

У Леонардо же, с его стремлением познавать «бесчисленные связи в каждом явлении», не могло возникнуть и мысли о несовместимости геометрической оптики и представлений о волновой природе света. Ведь необходимость рассмотрения явления в целом составляет одно из наиболее важных положений научного метода этого величайшего универсального гения в истории человечества.

«Внимательно изучайте меня, читатели, если Вы восхищаетесь мной, ибо очень редко я буду возвращаться в мир, и потому что упорство в этой профессии можно найти лишь среди немногих, и только среди тех, кто желает создавать новое. Приходите, люди, поглядеть на чудеса, какие научные занятия раскрывают в Природе».

Леонардо впервые заметил и подробно описал еще один красивый оптический эффект: «Глаз, глядящий на ярко освещенное тело, увидит круг, более яркий, чем окружающий воздух... Причина состоит в том, что эта яркость образуется в глазу, а не на самом деле вокруг тела, как кажется... И будет казаться, что отмеченные круги состоят из переходов различных цветов, как в радуге...». **С этим явлением, называемым в научной литературе дифракцией, связано дальнейшее совершенствование современных оптических систем**