

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

551.593.11

## МИРАЖИ\*)

А. Фрэйзер, У. Мах

*Известно несколько типичных видений, которые иногда возникают на суше и в море. Все они объясняются оптическими свойствами окружающей атмосферы.*

В 1906 г. Роберт Пири, направляясь к Северному полюсу, поднялся на вершину мыса Томаса Хаббарда, который расположен на северной окраине земли Акселя Гейберга. На северо-западе, как он полагал, милях в 120, он увидел поднимающиеся надо льдом заснеженные вершины. Позднее он увидел их снова, на сей раз с одного из близлежащих островов. Он писал: «Мое сердце забилося, когда я взгляделся в эту ледяную землю, и мысленно я уже ходил по ее берегам и взбирался на ее вершины, хотя знал, что это наслаждение придется уступить кому-то другому, кто придет сюда в будущем». Этим другим оказался Дональд Мак-Миллан, возглавивший в 1913 г. экспедицию на эту загадочную землю. И действительно, когда он достиг предполагаемого местоположения этой земли, она услужливо предстала перед ним во всей своей красе. Мак-Миллан писал: «Нет никаких сомнений в ее существовании. Великий Боже! Что это за земля! Холмы, долины, снежные вершины, простирающиеся, как минимум, градусов на 120 вдоль горизонта». Затем экспедиция «углубилась» в эту землю, пройдя по арктическому льду 30 миль и не увидев там ничего. Чудесная земля оказалась миражом!

Конечно, и Пири и Мак-Миллан знали об одном из наиболее типичных миражей, известном под названием Фата Моргана (Fairy Morgan), которая фигурирует в одной из легенд Артура цикла как сестра короля Артура. Она обладала магической силой создавать воздушные замки. С ретроспективной точки зрения в этих легендах, вероятно, описано то, что действительно случается в природе: видения Фата Моргана лишены всякого сходства с объектами, из которых они возникают. Последними всегда оказываются бесплодная снежная пустыня или вода.

Одно из лучших первых описаний Фата Моргана содержится в письме итальянского священника Ангелуччи своему коллеге. Утром 14 августа 1643 г. он вышел к Мессинскому проливу около города Реджио на самом юге Италии. Согласно его описанию «океан, омывающий берег Сицилии, вздымался ввысь и был подобен темной горной гряде. Перед горами быстро возникала цепь из более чем 10 000 пилястр белесовато-серого

\*) Alistair B. Fraser, William H. Mach, Mirages, Scientific American 234 (1), 102—111 (January 1976). Перевод И. И. Ройзена.

А. Фрэйзер — исполняющий обязанности профессора метеорологии, У. Мах — научный сотрудник кафедры метеорологии Университета штата Пенсильвания, США.

© Scientific American, Inc., 1976.

© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1978.

цвета, которые затем уменьшались по высоте вдвое и образовывали арки наподобие арок римских акведуков. Прежде, чем они исчезли, поверх акведуков возникли замки, каждый с башнями и окнами.»

Чтобы понять, каким образом атмосфера порождает подобные странные видения, нужно сначала разобраться в причинах возникновения более простых миражей. Особенно наглядный и типичный мираж видел и сфотографировал (рис. 1) весной 1972 г. один из нас (А. Ф.). Он с изумлением наблюдал, как два мальчика покинули снеттлский пляж и прогуливались по воде между парусными шлюпками. Сцена была до такой степени неправдоподобно реальна, что после этого легко было поверить рассказам о людях, идущих по воде, тем самым рассказам, которые встречаются не только в Библии, но также и в буддистской литературе, и у греков эллинского периода.

Этот простейший мираж отличается от Фата Морганы — миража, создающего объекты, которых на самом деле нет — тем, что мальчики, прогуливавшиеся по воде, реально существовали. Однако атмосфера,

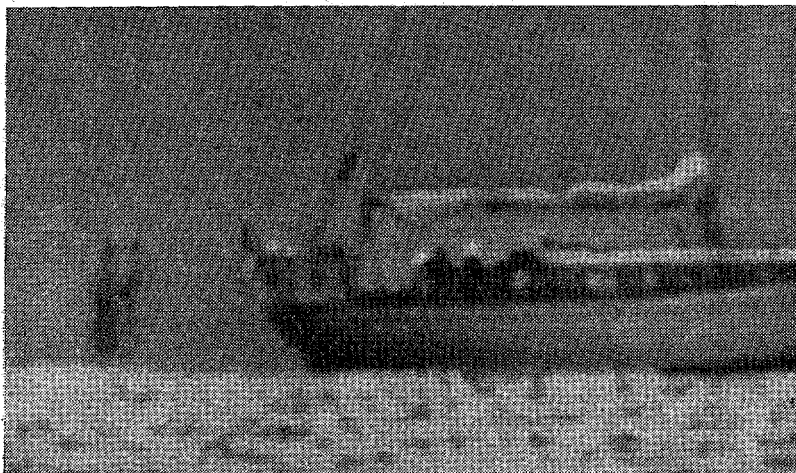


Рис. 1. Этот мираж производит впечатление прогулки по воде.

Два мальчика слева от парусной шлюпки в действительности прогуливаются во время отлива по песчаной отмели, которая скрыта под оптическим горизонтом (как и ступни мальчиков). Из-за этого кажется, что они идут по воде. Так как, кроме того, их фигуры увеличены, они кажутся выше и потому ближе, чем люди в шлюпке, хотя в действительности мальчики находятся значительно дальше от наблюдателя.

находившаяся между ними и наблюдателем, действовала как гигантская линза, искривляющая траектории проходящих сквозь нее световых лучей. Поэтому видение людей, идущих по воде, связано с реальными объектами, но тем не менее это иллюзия, а не реально существующая картина. Разумеется, нельзя считать такие видения доказательством того, что на самом деле может происходить нечто подобное. Обычно указанное различие между видением и объектом считается само собой разумеющимся. К примеру, мы не сомневаемся, что искаженное изображение, которое может появиться на экране телевизора, иллюзорно, и что где-то далеко, перед телеобъективом находится вполне нормальный реальный объект. Изображения, видимые сквозь атмосферные линзы, не более иллюзорны, чем картины, которые можно наблюдать в телескоп и даже через очки. Просто, рассматривая предметы сквозь атмосферные или любые другие линзы, мы видим их не такими, какими они являются в действительности.

Слово мираж произошло от французского глагола *se mirer*, что означает «отражать». Но, хотя многие миражи напоминают картины, которые можно увидеть в кривом зеркале, эффект отражения не является причиной возникновения миражей. Атмосфера порождает миражи, действуя как линза, а не как зеркало, т. е. не благодаря отражению света, а в силу рефракции. Только эта линза, конечно, отличается от тех линз, которые используются в кино- и фотокамерах, или в очках. Последние сделаны из стекла и строго однородны по показателю преломления. При этом искривление пути светового луча и характер изображения определяются кривизной соответствующих поверхностей. Атмосферная линза не имеет определенной формы, так как и сам объект, и наблюдатель находятся внутри нее. В ходе метеорологических исследований, проведенных нами в Пенсильванском университете, мы убедились, в частности, в удивительной способности атмосферных линз создавать различные видения и видоизменять информацию, переносимую светом, по мере его распространения сквозь толщу воздуха.

Показатель преломления атмосферы зависит от ее плотности и влажности. Правда, влияние последней на оптические свойства атмосферы так незначительно, что его можно не учитывать. Плотность воздуха в свою очередь зависит от его температуры и давления. Поскольку большинство обсуждаемых нами миражей обусловлено небольшими слоями воздуха, внутри которых давление меняется незначительно, мы будем считать, что показатель преломления зависит только от температуры.

Чем выше температура, тем меньше плотность и, следовательно, тем меньше показатель преломления. Чем больше градиент температуры, тем резче изменяется показатель преломления и тем сильнее искривляется путь светового луча. Если внутри всего интересующего нас слоя температура одинакова, то свет в нем будет распространяться прямолинейно. Таким образом, существование атмосферных линз и создаваемых ими миражей определяется тем, как изменяется температура атмосферы, прежде всего, в зависимости от высоты.

□

Если температура атмосферы зависит от высоты линейно, то свет в этой области будет распространяться по параболической траектории (рис. 2, а). Искривление пути света пропорционально градиенту температуры в направлении, перпендикулярном лучу. Таким образом, путь луча искривляется максимально в случае, когда он движется вдоль линии постоянной температуры. Это искривление ответственно за такое видение, как, скажем, кажущееся смещение удаленного корабля от своего реального местоположения. Так как путь луча всегда искривляется в сторону холодного (более плотного) воздуха, изображение предмета смещается в направлении более теплого (менее плотного) воздуха.

Большинство миражей разыгрывается на расстояниях от полукилометра до примерно пяти километров, так что на них мало сказывается кривизна земной поверхности. Поэтому, говоря о них, удобно считать землю плоской. Любая поверхность, расположенная на определенной высоте над «плоской» землей, также является плоской. Если в атмосфере есть градиент температуры, путь проходящего через нее светового луча не прямолинеен, а искривлен.

Световые лучи распространяются в реальном пространстве, в котором их путь не всегда совпадает с той прямолинейной экстраполяцией, которую приписывает им глаз наблюдателя. Мы всегда предполагаем, что свет от окружающих предметов приходит к нам по прямой линии. Поэтому, чтобы лучше понять механизм возникновения миража, удобнее представить себе, что луч света распространяется прямолинейно,

но в искривленном пространстве, в котором плоские поверхности (как, скажем, поверхность Земли) становятся изогнутыми. На рис. 2, б пространство изображено таким, каким оно представляется глазу наблюдателя. Назовем это пространство кажущимся или воображаемым. Мы будем описывать миражи, пользуясь именно этим пространством, свойства которого определяются в основном градиентом температуры (или показателем преломления) в нескольких метрах нижнего слоя атмосферы.

Миражи различаются прежде всего по тому, в каком направлении они искривляют поверхности в воображаемом пространстве. Если с высотой температура возрастает, то горизонтальная поверхность, скажем,

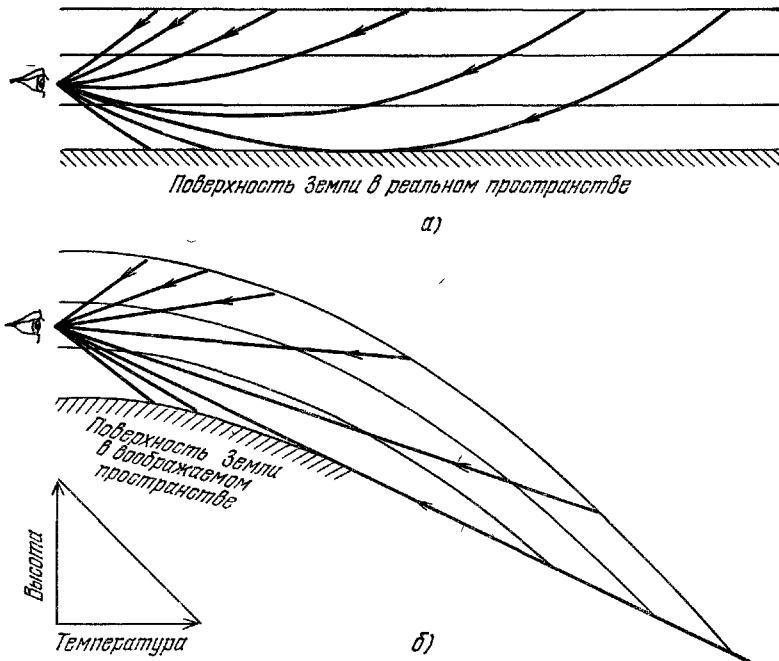


Рис. 2. Различие между реальным и воображаемым пространством.

Если свет проходит через атмосферу с постоянным градиентом температуры (как показано на рисунке), то он распространяется по параболе. Это — картина, которая имеет место в реальном пространстве (рис. а). Между тем наблюдатель интерпретирует видимое им изображение, считая, что свет распространяется прямолинейно. Поэтому, объясняя мираж, удобнее сохранить эту прямолинейность ценой искривления самого реального пространства (рис. б). В результате плоские поверхности станут искривленными, т. е. именно такими, какими видит их наблюдатель (тонкие линии). Это кривое пространство — назовем его кажущимся или воображаемым — будет все время использоваться нами в дальнейшем.

поверхность воды, искривляется вверх (она поднимается по мере удаления от наблюдателя), т. е. происходит повышение. Это создает у рассматривающего ее в бинокль наблюдателя впечатление, что он находится внутри огромной неглубокой чаши. В результате возникает мираж, смещающий видимое изображение вверх от истинного положения объекта. Английские моряки называют это явление словом «looming» (см., например, рис. 3—5).

Если же по мере увеличения высоты температура падает, то, наоборот, горизонтальная поверхность в воображаемом пространстве выглядит изогнутой вниз. Теперь у наблюдателя возникает впечатление перевернутой чаши, на вершине которой находится он сам. В результате появляется оптический горизонт, за пределами которого поверхность увидеть нельзя. Это явление иногда называют понижением (sinking; см., например, рис. 6, 7).

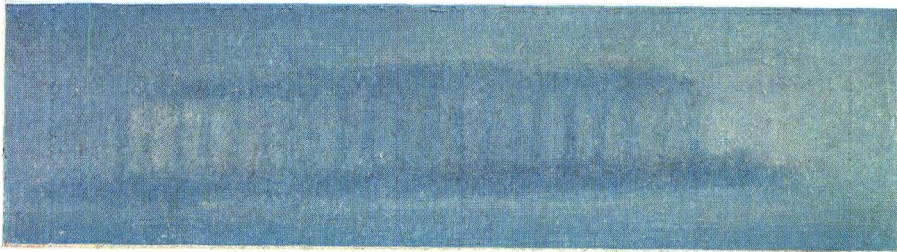


Рис. 4. Фотография миража, сместившего тот же паром вверх от истинного положения. Этот мираж обусловлен возрастанием температуры с высотой. Удлиненные и сплюснутые пассажирская палуба и капитанский мостик соответствуют тому, что паром находится вблизи точки А (см. ниже, рис. 13) в воображаемом пространстве.



Рис. 5. Вследствие миража тот же паром «сплюснут» и поднят высоко вверх. Это соответствует тому, что он находится вблизи точки С (см. ниже, рис. 12) в воображаемом пространстве.



Рис. 6. Фотография миража, сместившего тот же паром вниз от истинного поглощения и растянувшего его по вертикали. Этот мираж обусловлен возрастанием температуры и ее градиента по мере приближения к поверхности воды.

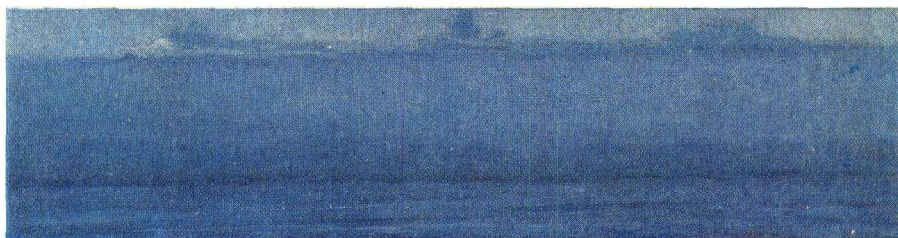


Рис. 7. Двукратный мираж того же типа, на котором видна только та часть парома, которая расположена выше капитанского мостика. Условия те же, что и в случае миража, представленного на предыдущем рисунке, но градиент температуры у поверхности воды больше.

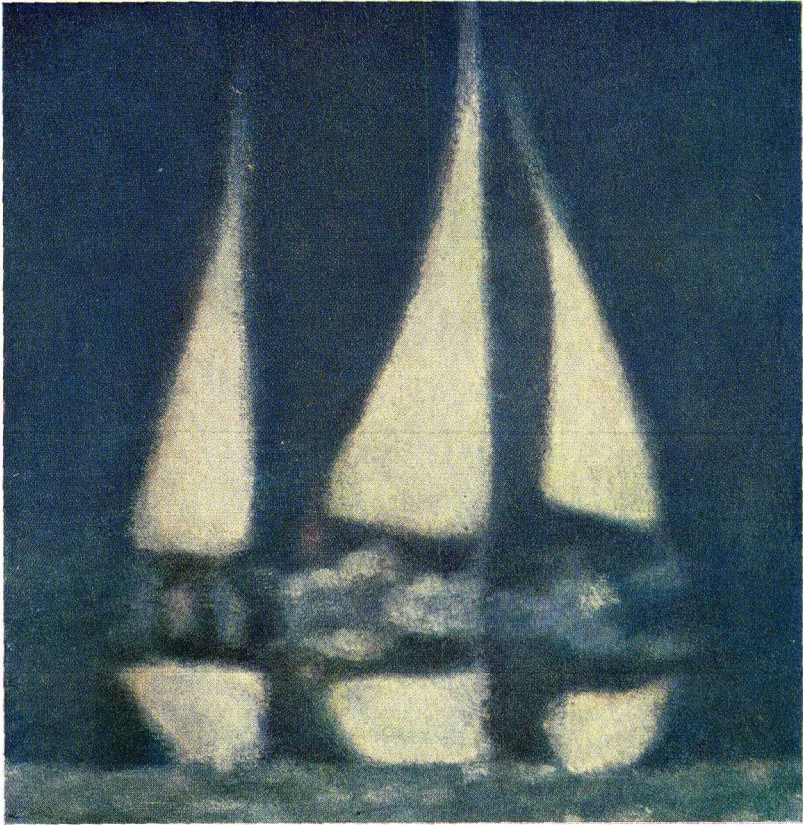


Рис. 8. На первый взгляд кажется, что здесь сфотографирована двухмачтовая парусная шлюпка и ее отражение в воде.

На самом же деле это двойной мираж. На верхнем мираже корпус шлюпки вообще не виден (это типично для всех двойных миражей). Кроме того, если внимательно присмотреться к поверхности воды, то станет очевидно, что второе, перевернутое, изображение слишком грубо для того, чтобы быть отражением в воде. Этот мираж обусловлен тем, что вблизи поверхности температура падает с ростом высоты, так что атмосфера действует как огромная линза, искривляющая траектории световых лучей на пути между объектом и камерой. При противоположном ходе температуры возник бы мираж иного типа.

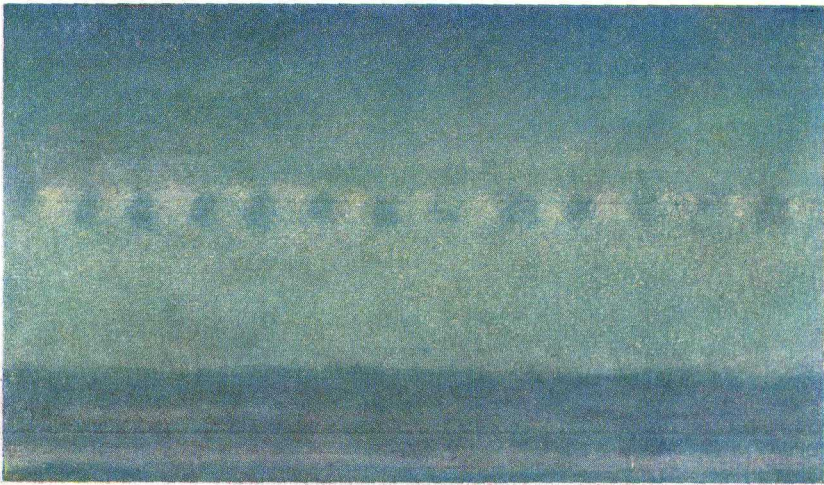


Рис. 9. Мираж Фата Моргана, имеющий вид белесовато-серой стены, на которой видны пилястры и справа арки.

Эта «стена» в действительности является отображением сильно увеличенного по вертикали участка поверхности моря, но атмосферная линза так сильно размывает изображение, что детали на этой поверхности совершенно неразличимы. Та же дефокусировка может создать такую освещенность, что поверхность будет состоять из светлых и темных пятен, которые легко по ошибке принять за очертания реальных объектов — зданий, гор и т. п.

Именно такой мираж ответствен за видение двух мальчиков (см. рис. 1), прогуливающихся по воде. В действительности они гуляли по длинной песчаной отмели во время отлива, но их ступни и сама отмель находились за оптическим горизонтом и были невидимы. Остальная же часть их фигур осталась «подвешенной» над поверхностью окружающей воды.

Температурный режим, приводящий к подобным эффектам, весьма характерен для замкнутых водоемов ранним утром, когда вода еще сохранила в течение ночи свое тепло, а воздух над ней уже остыл. В результате воздух над поверхностью воды подогревается снизу и по мере увеличения высоты температура падает.

□

Что касается математической стороны дела, т. е. расчета двух упомянутых типов миражей, разница между ними ничтожна. В первом случае

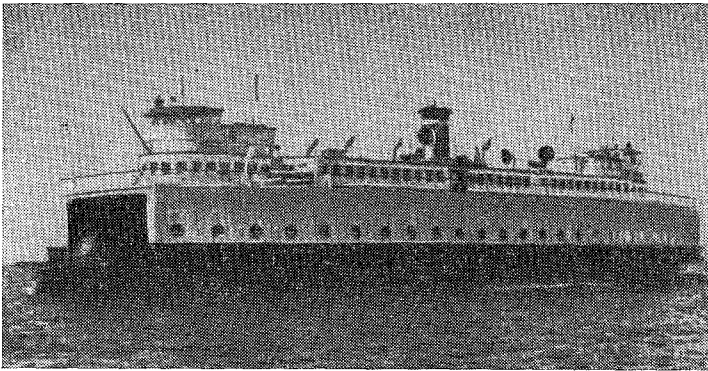


Рис. 3. Паровой паром: неискаженная фотография.

мы имеем дело с искривленной чашеобразной поверхностью, на дне которой находится наблюдатель, во втором — с той же поверхностью, только перевернутой, и наблюдателем — в ее верхней точке. В первом случае наблюдатель видит внутренность «чашки», во втором ее внешнюю сторону, причем не всю, а только в пределах, ограниченных горизонтом. Однако с метеорологической точки зрения их удобно различать, так как они возникают при взаимно противоположных метеорологических условиях.

Проанализируем теперь особенности миражей более детально. Первый вопрос, который сразу же возникает, — в каком случае мираж увеличивает истинные размеры предмета, а в каком их уменьшает. Ответ на него прост. Если градиент температуры постоянен, т. е. не зависит от высоты, то мираж сводится только лишь к смещению объекта вверх или вниз как целого без изменения его линейных размеров. Скажем, голова человека смещается так же, как и его ноги, так что все пропорции сохраняются. Однако в природе редко реализуется такая простая ситуация, когда на нескольких нижних метрах атмосферы градиент температуры постоянен.

Температурные характеристики атмосферы вблизи поверхности Земли определяются механизмом теплообмена. Непосредственно у самой поверхности (в слое в несколько сантиметров) теплопередача обеспечивается в основном молекулярной теплопроводностью и излучением, в то время как выше доминирует конвекция. Последняя является наиболее эффективным из этих трех механизмов и обеспечивает достаточно быстрый теплообмен даже при малых градиентах температуры. Вполне естественно,

что градиент температуры максимален у поверхности и убывает по мере увеличения высоты. В результате возникает такой температурный профиль, который приводит к миражу с измененными пропорциями объекта.

Мираж, при котором происходит уменьшение линейных размеров объекта, называют «сутулым» (stooping). Он возникает, если градиент температуры уменьшается по мере ее роста. Подобная ситуация характерна для атмосферы над поверхностью озера или узкого пролива при солнечной погоде в предвечерние часы, когда нагретый за день воздух устремляется с окружающих берегов в сторону водоема и охлаждается водой снизу. В этом случае наибольшим градиентом и наименьшей температурой характеризуется низший слой атмосферы, непосредственно прилегающий к поверхности воды, а по мере удаления от нее градиент уменьшается и температура возрастает. В результате может возникнуть мираж, при котором, во-первых, кажущееся изображение предмета смещается вверх от истинного и, во-вторых, его нижняя часть смещается больше, чем верхняя, т. е. происходит сокращение линейных размеров по вертикали (сплющивание).

По этой причине наблюдателю, стоящему на берегу, часто может казаться, что удаленные от него объекты в течение дня постепенно уменьшаются по высоте. Так как при этом их горизонтальные размеры не изменяются ввиду пренебрежимо малого градиента температуры по горизонтали, создается впечатление постепенного сплющивания.

Если же температура и ее градиент возрастают одновременно, то возникает обратная картина — растяжение вертикальных размеров (towering). Этот эффект почти всегда наблюдается в случае возникновения миража, смещающего изображение вниз от истинного положения объекта. Действительно, в этом случае поверхность теплее, чем воздух над ней, и он подогревается снизу. Там же по указанным выше причинам возникает и наибольший градиент температуры, так что и температура, и ее градиент падают по мере подъема вверх. Как уже отмечалось выше, такие условия часто реализуются вблизи поверхности замкнутых водоемов ранним утром, а также позднее над раскаленной солнцем поверхностью земли. Так как при понижении температура возрастает, кажущееся изображение удаленного объекта смещается вниз, причем его нижняя часть смещается значительно (из-за большего градиента), чем верхняя. Этот эффект, в частности, и иллюстрируется фотоснимком (см. рис. 1), запечатлевшим двух мальчиков, якобы прогуливающихся по воде. Оба они кажутся на ней такими же, или даже выше, людей на парусной шлюпке, хотя последние находились значительно ближе к фотоаппарату. Причина в том, что мираж «увеличил» рост мальчиков.

□

Переходим теперь к миражам с двойным изображением, которые, в частности, являются причиной заблуждения, многократно описанного путешественниками по пустыне, принимавшими этот мираж за долгожданный оазис. В этом случае «вода», которую они видят вдали, представляет собой в действительности второе (и притом перевернутое) отображение неба, уходящее под горизонт и потому имитирующее свет, отраженный от поверхности воды. Это результат двойного миража, который смещает объект вниз от его истинного положения (рис. 10).

Для возникновения двойного миража необходимы те же условия, что и для однократного: температура и ее градиент должны возрастать одновременно. Однако в этом случае необходима большая кривизна температурного профиля. Эффект достигается благодаря росту градиента температуры вблизи поверхности Земли или воды. Когда световые лучи проходят через область с большим градиентом температуры, их траекто-



рия искривляется настолько, что, отразившись от нижней части удаленного объекта, они уже не могут попасть в глаз наблюдателя. Вместо этого глаз видит верхнюю часть объекта. Таким образом, возникает его второе, перевернутое изображение. Перевернутым оно становится потому, что стоит наблюдателю посмотреть чуть-чуть выше, как в его глаз попадут

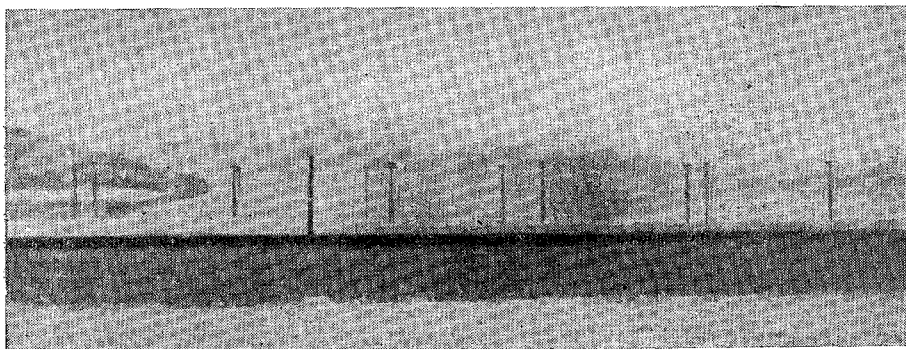


Рис. 10. Другим примером двойного миража может служить мираж в пустыне. Вопреки полной иллюзии находящегося вдали водоема, там нет ничего, кроме безводной пустыни и гор.

лучи, прошедшие через слой атмосферы с меньшим градиентом температуры и, следовательно, по менее искривленному пути. Легко понять, что они придут из точки, расположенной на объекте ниже (а не выше, как при обычных температурных условиях). В результате видимое наблюдателем изображение объекта кажется ему перевернутым.

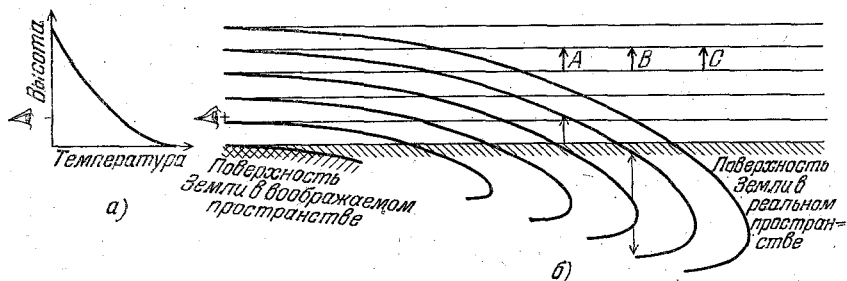


Рис. 11. Воображаемое пространство в случае двойного миража.

Если градиент температуры максимален при максимальной температуре (а), то может возникнуть двойное изображение. Так как температура повышается по мере приближения к поверхности Земли, при удалении от наблюдателя все поверхности в воображаемом пространстве (толстые линии) заглубаются вниз, хотя в реальном пространстве они горизонтальны (тонкие линии). В результате объект А будет казаться увеличенным и смещенным вниз, объект В раздвоится, причем одно изображение будет перевернутым. Объект С вообще будет виден только в том случае, если он несколько выше.

На диаграмме (рис. 11) показано соответствующее этому случаю воображаемое пространство. Мы видим, что в нем различные поверхности не могут простираться неограниченно. Нижняя поверхность начинается на оптическом горизонте, а другие — на расстояниях, которые увеличиваются с высотой поверхности. Все они исчезают на конце похожего на нос профиля, благодаря которому часть поверхности фигурирует в изображении дважды.

Если объект, расположенный на некоторой высоте, удаляется от наблюдателя, последний видит сначала его однократное изображение, затем

двойной мираж и, наконец, перестает видеть этот объект совсем. Например, путник, удаляющийся от вас в пустыне, будет исчезать из вашего поля зрения, начиная с ног. Вам будет казаться, что он погружается в море и постепенно исчезает в нем (рис. 12).

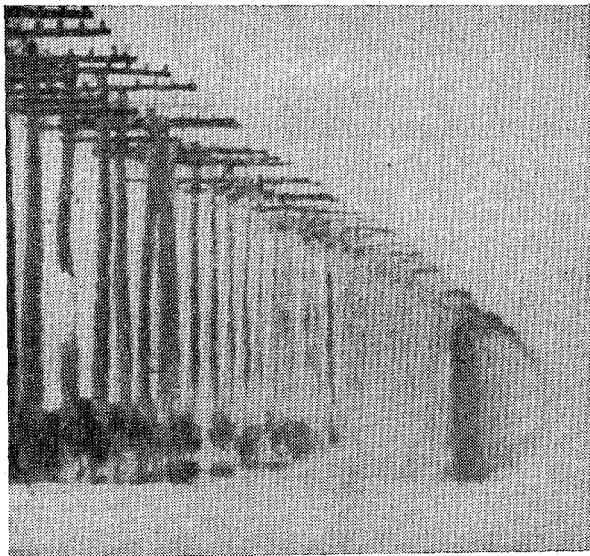


Рис. 12. Столбы линии электропередач по мере удаления от наблюдателя «погружаются в воду».

Этот эффект вызван двойным миражом, понижающим изображение реального объекта и соответствует воображаемому пространству, представленному на рис. 11. Перевернутое изображение (второй мираж) создает иллюзию отражения в воде. Между тем эта фотография сделана в пустыне в районе Больших соленых озер.

вместе с ними уменьшается кривизна пути световых лучей и мираж «вода» удаляется от путешественника.

Часто наблюдателю бывает довольно трудно решить, что перед ним: реальная водная поверхность или мираж, особенно в том случае, если двойной мираж наблюдается действительно над поверхностью воды (см., например, фотографию — рис. 8 на вклейке). Если это мираж, то видимое изображение сильно зависит от направления взгляда наблюдателя. Стоит ему присесть, как оптический горизонт намного приближается, и удаленные объекты сразу же исчезают из поля зрения. Они появляются снова, как только он встанет. Обыкновенное отражение не так капризно.

Чтобы возник трехкратный мираж, температурные условия должны быть такими же, что и для двукратного (температура и ее градиент должны возрастать одновременно), но, кроме этого, участок, на котором градиент температуры возрастает, должен быть меньше. Грубо говоря, это эквивалентно тому, что кривизна температурного профиля уменьшается при повышении температуры.

Типичным примером может служить «локтеобразный» профиль, который формируется вблизи стены, освещенной солнцем. Когда прямые солнечные лучи падают на большую однородную стену, она сильно нагревается и отдает тепло окружающему воздуху как внутри, так и вне здания. В нескольких сантиметрах от стены происходит перепад температуры. Так как градиент направлен по горизонтали, изображение смещается в сторону от истинного положения объекта и возникает горизон-

□  
Расстояние до края «водной поверхности» и есть расстояние до оптического горизонта. Оно определяется самым низким из видимых наблюдателем лучом, который лишь касается земли. Когда наблюдатель идет, то вместе с ним перемещается и оптический горизонт. Это явление хорошо знакомо водителям, которые видят, как «вода на дороге» убегает по мере приближения к ней. Точно так же в пустыне «вода» окружает путника со всех сторон и движется вместе с ним. С наступлением вечера пустыня постепенно остывает, температурные градиенты падают,

тальный мираж. В результате объект, расположенный вдоль стены близко к наблюдателю, порождает однократное изображение, удаленный объект — двойное, а объект, находящийся в узком интервале промежуточных расстояний, — тройное изображение.

Часто трехкратный мираж можно наблюдать над поверхностью замкнутых водоемов — большого озера, или залива, или узкого пролива в послеполюденное время теплым весенним, или летним днем. Он обусловлен тем, что температурный профиль вблизи поверхности воды имеет точку перегиба. Из-за того, что теплый воздух с берегов распространяется вдоль поверхности более холодной воды, его температура здесь возрастает с высотой. Однако в результате турбулентного перемешивания, которое

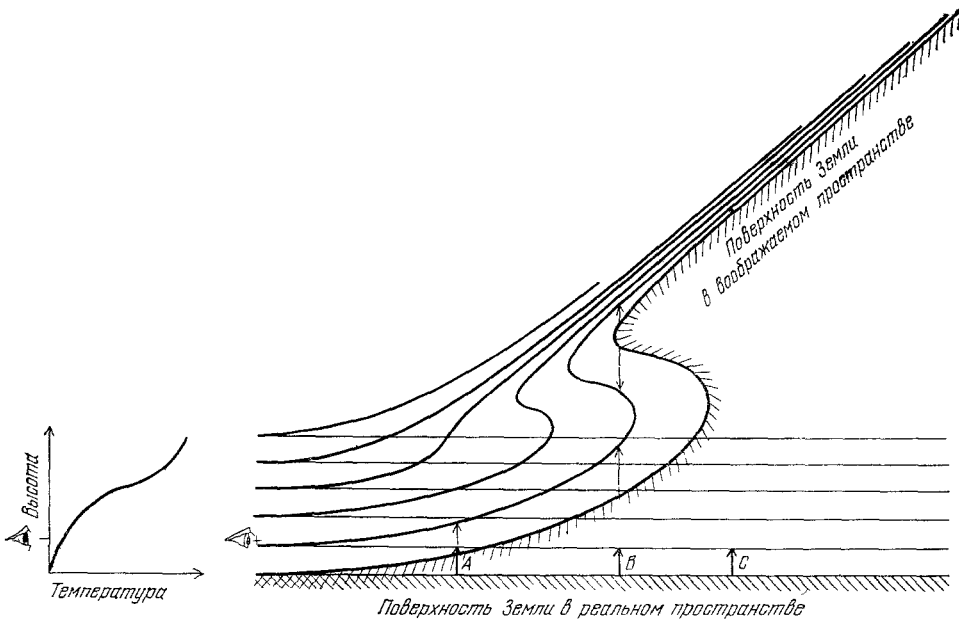


Рис. 13. Воображаемое пространство в случае тройного миража соответствует температурному профилю с точкой перегиба.

Такой режим часто реализуется над поверхностью закрытых водоемов в послеполюденные часы солнечным днем. Кажущаяся поверхность воды приобретает вид огромной уплощенной буквы S. Объект B, расположенный там, где эта поверхность собирается в складку, будет смещен вверх от своего реального положения и будет виден трижды. Объект A породит только одно изображение, но если оно пройдет по вертикали, через всю диаграмму, то его центральная часть будет растянута, а верхняя сжата. Объект C будет казаться очень сильно сплюснутым.

при этом происходит, градиент температуры в нескольких нижних метрах над поверхностью воды незначителен. С высотой он сначала возрастает, а затем снова падает. Таким образом, кривизна температурного профиля уменьшается с высотой, обращаясь в нуль в точке перегиба — там, где градиент температуры достигает максимума.

Эта линза тем удивительна, что наблюдателю кажется, будто поверхность воды имеет форму уплощенной буквы S (рис. 13). Объект, расположенный там, где эта поверхность образует «складку», будет виден трижды. По этому рисунку легко проследить удивительные метаморфозы, которые происходят с видимым изображением объекта по мере удаления последнего от наблюдателя.

Температурный профиль с точкой перегиба не обязательно приводит к возникновению трехкратного миража. Если градиент температуры вблизи этой точки несколько меньше, то поверхность в воображаемом

пространстве не собирается в складку, а устремляется вверх, образуя «стенку» (см. рис. 14). Поэтому объект, расположенный на соответствующем расстоянии, будет виден сильно увеличенным по вертикали. Это первый и самый простой атрибут Фата Морганы.

□

Но для того, чтобы она проявилась во всей своей красе, этого еще недостаточно. Пока мы еще не объяснили, откуда берется множество связанных с ней удивительных образов — замки и пилястры, описанные

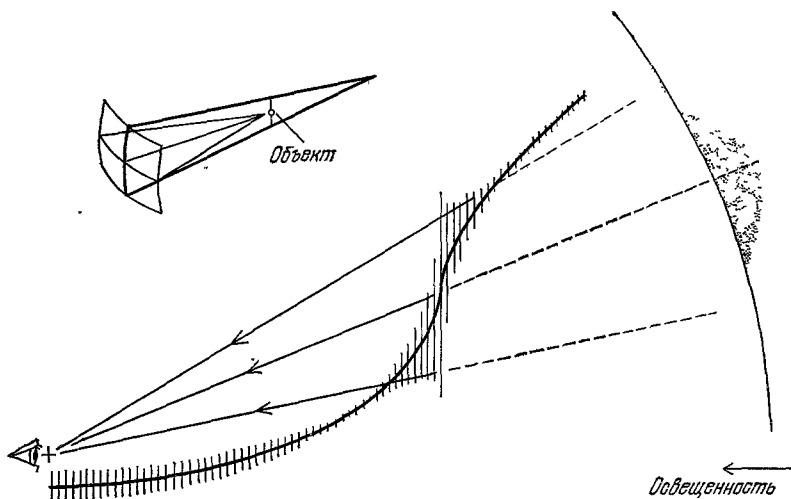


Рис. 14. Для возникновения Фата Моргана также необходимо, чтобы в температурном профиле была точка перегиба, но градиент температуры вблизи этой точки должен быть несколько меньше, чем на рис. 13.

Тогда кажущаяся поверхность воды не образует складку, а поднимется вверх и встанет стеной. Астигматический эффект приводит к несферичности фронта волны и дефокусировке, так что удаленный точечный объект предстанет в виде размытой вертикальной линии (слева сверху). Он же создает такую игру освещенности, что центр стены будет казаться значительно темнее периферии (справа).

Ангелуччи, и горные вершины, которые очаровали Пири и Мак-Миллана. Для того чтобы понять все это, необходимо несколько глубже разобраться в особенностях атмосферных линз.

До сих пор мы говорили только о том, как они могут видоизменять изображение реальных объектов: размножать его, переворачивать и т. п. Однако пока еще ничего не было сказано о качестве этого изображения, в первую очередь об его четкости, хотя фотографии, иллюстрирующие нашу статью, свидетельствуют о том, что оно может изменяться в больших пределах. Недостаточную четкость можно, в известной степени, объяснить мерцанием, обусловленным небольшими неоднородностями в плотности и температуре атмосферы, которые связаны с турбулентным движением воздуха. Вторая причина нечеткости — это астигматизм атмосферной линзы.

Астигматические искажения вызваны тем, что фронт воспринимаемой глазом световой волны не является вполне сферическим, а включает небольшие эллипсоидальные отклонения (рис. 14). В результате кривизна его горизонтального и вертикального сечений различна. Между тем, как известно, именно ею определяются условия фокусировки световых лучей на сетчатке глаза или на пленке фотокамеры. Поэтому эллипсоидальные отклонения от сферичности исключают возможность одновременной фокусировки по горизонтали и вертикали, оставляя лишь выбор

между тем и другим. Фактически же в атмосфере нет даже и этого выбора: четкости изображения можно достигнуть только по горизонтали, так как кривизна сечения по вертикали подвержена быстрым колебаниям. В результате дискретный объект кажется нам диффузной вертикальной линией.

□

Астигматизм приводит и к другому любопытному эффекту, он может быть ответствен за кажущуюся неравномерную освещенность изображения. Для того чтобы разобраться в этом, рассмотрим удаленный точечный

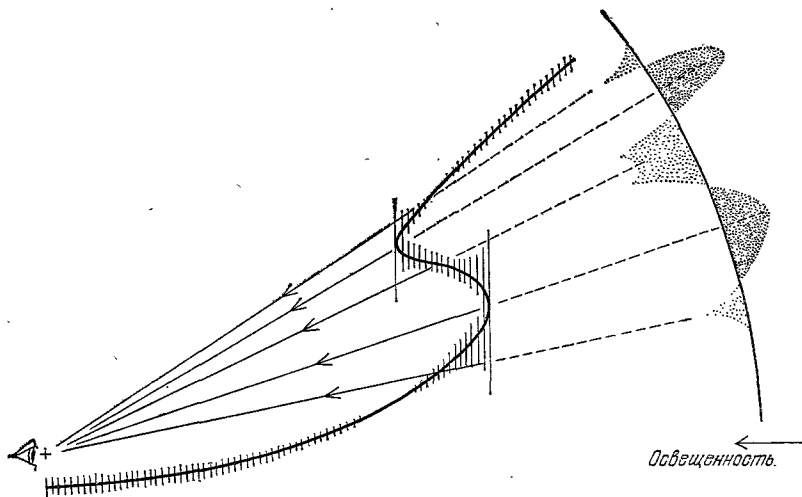


Рис. 15. Трехкратный мираж, сопровождаемый астигматическим размытием, порождает иллюзию наклонной стены, детальная структура которой совершенно неразличима. Освещенность этой стены такова, что ее центр светлее периферии. Эта светлая полоса представляется глазу пеленой тумана и известна под названием Фата Бромоза. Волны плотности в атмосфере колеблют это изображение, и оно предстает то вертикальной темной, то наклонной светлой стеной. Возникающее в результате чередование светлых и темных пятен может создать у наблюдателя впечатление, что он видит разнообразные картины, в том числе горы и недостроенные здания.

источник света. Расфокусированность по вертикали означает, что свет от него распределяется каким-то образом вдоль всего видимого протяженного изображения, которого в противном случае просто не было бы. Другими словами, световая энергия перераспределяется так, что сам источник становится темнее, чем в отсутствие астигматизма, зато становится освещенной некоторая область выше и ниже него. Поскольку, в то же время, астигматический эффект очень неодинаков для различных частей миража, даже равномерно освещенная поверхность будет казаться глазу неоднородной по яркости.

Этот эффект лежит в основе часто сопутствующего миражу явления, называемого Фата Бромоза, или волшебным туманом (рис. 15). Абсолютно плоская и равномерно освещенная морская гладь в воображаемом пространстве деформируется и выглядит слегка наклоненной стеной. Размывающее воздействие астигматизма стирает на этой «стене» все детали, так что распознать в ней морскую поверхность становится невозможно, а в результате перераспределения освещенности она кажется значительно светлее, чем окружающий ее фон. Поэтому возникает полная иллюзия пелены тумана над поверхностью воды.

Такой мираж обязан своим возникновением наличию точки перегиба в температурном профиле и связанному с этим утроению изображения. Если же градиент температуры вблизи этой точки убывает медленно,

то кажущаяся «стена» из наклонной становится вертикальной. Астигматический эффект и в этом случае смазывает детали, но теперь он меняет освещенность так, что эта «стена» становится темнее своего окружения.

Нам осталось лишь объяснить, почему взору Ангелуччи предстали десять тысяч пилястр. Они обязаны своим возникновением волнообразным движениям в атмосфере.

□<sub>4</sub>  
До сих пор, говоря о температуре воздуха, мы подразумевали, что он состоит из плоских горизонтальных слоев. Между тем, если под действием какой-то силы поверхности постоянной температуры (и плотности) в каком-то месте сместятся вверх или вниз, то возникнет колебание около положения равновесия, т. е. волнообразное движение этих поверхностей. (Ситуация вполне аналогична мелкой ряби на поверхности воды в плавательном бассейне.) Причиной возникновения этих волн служит ветер (источник энергии) и сила земного притяжения.

Из сказанного для нас важно то, что из-за этого волнообразного движения градиенты температуры в данной точке оказываются подвержены малым периодическим колебаниям. В результате поверхность воды кажется нам то слегка наклоненной и светлой, то вертикальной и темной. Каждая волна приводит к появлению очередной белесовато-серой пилястры. Небольшое повышение среднего градиента температуры может трансформировать видимое изображение так, что оно будет казаться нам светлой стеной с периодически расположенными на ней темными окнами. Одним словом, небольшие колебания формы температурного профиля и амплитуды волн плотности — вот, что необходимо для объяснения всего того, что видели Ангелуччи и Пири.

В то время как простой мираж только сдвигает и искажает изображение реально существующих объектов, Фата Моргана способна привести к таким удивительным метаморфозам, что видимое изображение уже теряет всякое сходство с породившим его оригиналом (см. рис. 9 на вклейке). Этот мираж способен «превратить» плоскую, равномерно освещенную поверхность воды, снега или земли в стену, с которой стерта вся первичная информация об этих объектах. Игра освещенности может привести к появлению на этой стене всевозможных фантастических картин. Поэтому не приходится удивляться, что миражи зачастую принимались за волшебство.

#### ЛИТЕРАТУРА

- J. M. P e r n t n e r, Meteorologische Optik, W. Braumüller, 1902.  
A. B. F r a s e r, Appl. Optics A14 (4), 92 (April 1975).

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

538.3(09)

**К ДИСКУССИЯМ ПО ПРОБЛЕМЕ ПОНДЕРОМОТОРНЫХ СИЛ****В. И. Павлов**

В последнее время к проблемам, связанным с пондеромоторными эффектами, привлечено большое внимание. Об этом свидетельствует, в частности, появление значительного количества обзорных и методических статей (<sup>1-7</sup> и др.), а также появление ряда важных экспериментальных работ (<sup>8-11</sup> и др.).

Вопросы пондеромоторных сил и пондеромоторных эффектов еще в прошлом веке интересовали многих ученых. И несмотря на большое количество работ, посвященных данной теме и выполненных в течение длительного периода времени, рассматриваемые вопросы по-прежнему остаются проблемными и актуальными (см., например, <sup>12</sup>), так как имеют не только теоретическое, но и прикладное значение.

В данном сообщении хотелось бы обсудить с точки зрения современных представлений причины некоторых дискуссий, имевших место в прошлом.

1. В качестве *первого примера* приведем известную еще с прошлого века дискуссию о выражениях плотности пондеромоторных сил, с которыми статическое электрическое поле действует на электрически нейтральные жидкие диэлектрики.

Известны два решения. Одно, восходящее к работе Кельвина \*) <sup>13</sup>, имеет вид

$$f^{\text{Кельв}} = (P \nabla) E, \quad (1)$$

где  $f$  — плотность пондеромоторной силы,  $P$  — поляризация,  $E$  — напряженность поля.

Другое решение, основанное на энергетических представлениях, принадлежит Гельмгольцу <sup>14</sup> (см. также работы Лорберга, Кортвега, Кирхгофа <sup>15-18</sup>):

$$f^{\text{Гельм}} = -\frac{E^2}{8\pi} \nabla \varepsilon + \nabla \left( \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \frac{E^2}{8\pi} \right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика,  $\rho$  — плотность диэлектрика.

После работы Гельмгольца обнаружилось различие получившихся результатов, и возникла дискуссия о правильности того или другого подходов, о правильности выражения для силы (Кельвина или Гельмгольца).

\*) Ссылка на эту работу, насколько нам известно, или вообще не приводится, или приводится неверно.

Лармор<sup>19</sup> выступил с критическими замечаниями по поводу теории Гельмгольца. Его поддержал Лайвенс<sup>20-21</sup>. Поскольку в рамках энергетического рассмотрения существенными были выражения для энергии поля в диэлектриках и магнетиках, а также формулировка первого закона термодинамики для поляризуемых и деформируемых сред, — возникли бурные дискуссии по этим вопросам (укажем лишь работы Стонера, Лайвенса, Гуттенхейма<sup>22-26</sup>), прекратившиеся лишь после смерти Лайвенса.

Стрэттон<sup>27</sup> отмечает, что критика Лармора и Лайвенса вряд ли была обоснованной. В конце 40-х — начале 50-х годов Смит-Уайт выступил с серией статей (назовем, для краткости, лишь наиболее обстоятельную<sup>28</sup>), в которых критиковал метод Гельмгольца как несостоятельный. Для истории данного вопроса представляют интерес работы Слепьяна (его статья<sup>29</sup> и ряд других о пондеромоторных силах).

В появившихся затем работах Пригожина, Мазура, де Гроота<sup>30-31</sup> и др. голландских ученых решение было получено вновь в рамках термодинамики и статической физики и, по-видимому, благодаря работам этих ученых, наконец, было найдено решение дискуссионного вопроса о правильности выражений для силы Кельвина (1) и Гельмгольца (2).

Суть решения в том, что в электромеханических системах физически определенным параметром оказывается не просто сила (1) или (2), а сочетание

$$f^{\text{пояд}} - \text{grad } p, \quad (3)$$

где  $p$  — давление в жидкости.

Поэтому оказался неверным альтернативный подход к выражениям сил (1), (2). На самом деле, верно и то, и другое выражение для силы, если их дополнить соответствующими значениями давления  $p$ . В частности, оказалось, что если в качестве  $p$  использовать значение  $p_0$ , которое было в жидкости в отсутствие поля, то в выражение (3) вместо  $f^{\text{пояд}}$  необходимо подставить силу Гельмгольца (2). Если же под  $f^{\text{пояд}}$  иметь в виду выражение Кельвина (1), то в качестве  $p$  следует использовать выражение

$$p = p_0 + \frac{EP}{2} + \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right) \frac{E^2}{2} \rho. \quad (4)$$

Легко показать, что в обоих случаях сумма (3) остается одинаковой.

В работе<sup>32</sup> подробно рассмотрен вопрос о пондеромоторных силах, действующих в электрическом поле на жидкий (или газообразный) и твердый диэлектрик. В частности, для жидких диэлектриков объемная плотность сил имеет вид

$$f = -\text{grad } p_0(\rho, T) + \frac{1}{8\pi} \text{grad} \left[ E^2 \rho \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \right] - \frac{E^2}{8\pi} \text{grad } \epsilon, \quad (5)$$

т. е. это фактически пондеромоторная сила Гельмгольца в сочетании с давлением  $p_0$  \*).

Тем не менее, несмотря на обстоятельные работы, о которых говорилось выше, по рассматриваемым вопросам появлялись все новые и новые работы, особенно в зарубежных журналах. В 1962 г. Хэйким в теоретической работе<sup>33</sup>, посвященной неполярным диэлектрикам, показал, что выражение для силы Гельмгольца (2) можно получить не только из энергетических, но и из модельных представлений. А в экспериментальной

\*) Отметим, что авторы, приводя в работе выражение для общей плотности сил, не выделяют особо давление и пондеромоторную силу, так же как и упругую силу и силу электромагнитную. Такое разделение делают некоторые специалисты, в том числе и те, которые принимали участие в дискуссии 1966 г. Упоминание о ней см. ниже.



работе Хэйкима и Хигэма<sup>34</sup> показано, что по крайней мере для неполярных диэлектриков, верно выражение для силы (2), а не выражение (1). Большая дискуссия по этим и смежным вопросам состоялась в 1966 г. на страницах журнала «Proc. IEE» (см., например,<sup>35</sup>).

2. В качестве *второго примера* приведем выражение для пондеромоторной силы, полученное Эйнштейном и Лаубом<sup>36</sup>:

$$\mathbf{f}^{\partial \cdot \mathcal{L}} = \rho \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{j} \mathbf{H}] + (\mathbf{P} \nabla) \mathbf{E} + (\mathbf{M} \nabla) \mathbf{H} + \frac{1}{c} \left[ \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \mathbf{H} \right] - \frac{1}{c} \left[ \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \mathbf{E} \right]. \quad (6)$$

Это выражение определяет плотность силы, с которой электромагнитное поле действует на поляризующееся и намагничивающееся тело.

Причиной дискуссии, в связи с выражением (6), является (см. <sup>37-38</sup>) запись слагаемого, отображающего воздействие магнитного поля на ток в форме

$$\frac{1}{c} [\mathbf{j} \mathbf{H}], \quad (7)$$

а не в форме

$$\frac{1}{c} [\mathbf{j} \mathbf{B}], \quad (8)$$

как это имеет место в теории Лоренца.

Не входя подробно в детали, можно отметить, что причина указанных дискуссий состоит в неоднозначности разбиения суммарной силы на части, соответствующие силам, действующим на заряды и токи и на поляризацию и намагниченность. Используя уравнения Максвелла, можно показать, что уравнению Эйнштейна — Лауба (6) удастся придать вид

$$\mathbf{f}^{\partial \cdot \mathcal{L}} = \rho \mathbf{E} + [\mathbf{j} \mathbf{B}] + (\nabla \mathbf{E}) \mathbf{P} + (\nabla \mathbf{H}) \mathbf{M} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} ([\mathbf{P} \mathbf{B}] - [\mathbf{M} \mathbf{E}]). \quad (9)$$

Как видно, в этом выражении сила, действующая на ток, определяется уже не через напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}$ , а через индукцию  $\mathbf{B}$ , и причина различных выражений, таким образом, состоит, как и в предыдущем случае, в неоднозначности разбиения суммарной силы.

3. Еще одним примером может служить дискуссия по поводу правильности выражений для тензоров энергии-импульса и соответствующих им пондеромоторных сил в формах Абрагама<sup>39</sup> и Минковского<sup>40</sup>. Мы здесь не будем рассматривать релятивистские выражения указанных величин, поскольку различия сохраняются и в простом случае неподвижных веществ, помещенных в электромагнитное поле.

Из теории Абрагама следует, что дополнительно к выражению силы, следующей из теории Минковского, должна еще существовать и добавочная сила, равная

$$\mathbf{f}^{\mathbf{A}} = \frac{1}{4\pi c} \frac{\partial}{\partial t} ([\mathbf{D} \mathbf{B}] - [\mathbf{E} \mathbf{H}]). \quad (10)$$

Хотя эта сила чрезвычайно мала, тем не менее ее существование заметным образом сказалось бы на основных принципах теории электромагнетизма. Это обстоятельство и явилось причиной длительных, более чем полувековых, дискуссий.

Как сообщалось в работе<sup>9</sup>, в 1975 г. эта сила, наконец, была измерена. Однако вскоре появились работы (например,<sup>41</sup>), в которых ставится под сомнение достоверность интерпретации экспериментов<sup>7</sup> по измерению силы Абрагама.

Причиной как существовавших, так и продолжающихся дискуссий, является отсутствие возможности однозначно определить пондеромоторную

силу и связанный с ней соотношением

$$f_{\alpha}^{\text{пони}} = - \frac{\partial T_{\alpha\beta}}{\partial x_{\beta}} \quad (11)$$

тензор энергии-импульса электромагнитного поля.

Дело еще и в том, что и Минковский, и Абрагам рассматривали только полевой тензор и в своих работах не приводили материальной или вещественной части тензора. Но, как отмечалось еще Мёллером <sup>42</sup> \*), наиболее общим уравнением, позволяющим находить различные параметры, является

$$\frac{\partial (T_{\alpha\beta}^{\text{поля}} + T_{\alpha\beta}^{\text{вещ}})}{\partial x_{\beta}} = 0, \quad (12)$$

т. е. равенство нулю четырехмерной дивергенции суммарного (вещества и поля) тензора энергии-импульса замкнутой системы. Следовательно, выбор только полевой части суммарного тензора энергии-импульса (а значит, и пондеромоторной силы) является произвольной операцией (кроме случая, где неучет материальной части не приведет к ошибке).

Суммируя рассмотренные решения и особенности данного вопроса, можно заключить, что методическая и теоретическая разработка возможностей экспериментального определения как суммарной силы, так и ее частей по-прежнему остается актуальной научной задачей.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. Brevik, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 37, Nr. 11, Nr. 13 (1970).
2. Д. В. Скобелевцын, УФН 122, 295 (1977).
3. В. Л. Гинзбург, УФН 122, 325 (1977).
4. Д. В. Скобелевцын, УФН 110, 253 (1973).
5. В. Л. Гинзбург, УФН 110, 309 (1973).
6. В. Л. Гинзбург, В. А. Угаров, УФН 118, 175 (1976).
7. F. N. Robinson, Phys. Rept. C16, 313 (1975).
8. R. W. Whitworth, H. V. Stopes-Roe, Nature 234, 31 (1971).
9. G. B. Walker, D. G. Lahoz, Nature 253, 339 (1975).
10. G. Roosen, C. Imbert, C.R. Ac. Sci. B277, 135, 147 (1973).
11. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, Phys. Rev. Lett. 30, 139 (1973).
12. Д. В. Скобелевцын, в кн. Вопросы математической физики, под ред. В. М. Тучкевича, Л., «Наука», 1976, с. 21.
13. W. Kelvin, Cambr. and Dublin Math. J., Novemb. 1845; то же: in «Electrostatics and Magnetism», 1872, p. 32.
14. H. Helmholtz, Ann. d. Phys. und Chem. 13, 385 (1881).
15. D. Korteweg, ibid. 9, 48 (1880).
16. H. Lorberg, ibid. 21, 300 (1884).
17. G. Kirchhoff, ibid. 24, 52 (1885).
18. G. Kirchhoff, ibid. 25, 601.
19. J. Larmor, Phil. Trans. A190, 280 (1897).
20. G. H. Liveness, Phil. Mag. 32, 162 (1916).
21. G. H. Liveness, The Theory of Electricity, Lnd., Cambridge Univ. Press, 1926.
22. E. Stoner, Phil. Mag. 19, 565 (1935); 23, 833 (1937).
23. E. Guggenheim, Proc. Roy. Soc. Lond. 155, 49, 70 (1936).
24. G. H. Liveness, Proc. Cambr. Phil. Soc. 44, 534 (1948).
25. E. Guggenheim, ibid. 45, 476 (1949).
26. Edit Not, ibid. 47, 450 (1951).
27. J. A. Stratton, Electromagnetic Theory N.Y., Mc Grav-Hill, 1941, p. 146.

\*) Уравнение описания системы «поле + вещество», т. е.  $\frac{\partial T_{ik}^{\text{сумм}}}{\partial x_k} = 0$ , впервые, насколько удалось выяснить, было введено в 1927 г. Тиррингом. До этого это уравнение встречалось в работе Эйнштейна 1916 г. применительно к гравитационному полю и в 1906 г. — в работе Пуанкаре, посвященной теории электрона.

28. W. S m i t t - W h i t e, Proc. Roy. Soc. N.S.W. 85, 82 (1951).
29. J. S l e r j a n, Proc. Natl. Acad. Sci. US 36, 485 (1950).
30. P. M a z u r, J. P r i g o g i n e, Mem. Acad. Roy. Belg. 28 (fasc. 1), Nr. 1637 (1953).
31. P. M a z u r, S. d e G r o o t, Physica 22, 657 (1956).
32. Л. Д. Л а н д а у, Е. М. Л и ф ш и ц, Электродинамика сплошных сред, М., Физматгиз, 1959.
33. S. H a k i m, Proc. IEE C109, 158 (1962).
34. S. H a k i m, J. H i g h a m, Proc. Phys. Soc. 80, 190 (1962).
35. Proc. IEE 113, 2095 (1966).
36. A. E i n s t e i n, J. L a u b, Ann. d. Phys. 26, 541 (1908) (имеется перевод: А. Эйнштейн, Собрание трудов, т. 1, М., «Наука», 1965, с. 126).
37. R. G a n s, Phys. Zs. 12, 806 (1911).
38. R. G r a m m e l, Ann. d. Phys. 41, 570 (1913).
39. M. A b r a h a m, Rend. Palermo 28, 1 (1909); 30, 33 (1910).
40. H. M i n k o w s k i, Göttingen Nachr. 53 (1908).
41. W. I s r a e l, California Institute of Technology Preprint OAP-387 (1975).
42. К. М ё л л е р, Теория относительности, М., Атомиздат, 1975.