

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

❖ КЛАССИКИ НАУКИ ❖

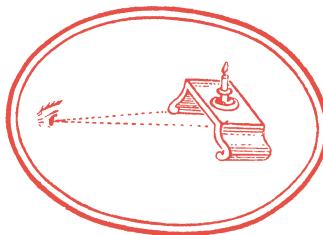


ПЬЕР БУГЕР

ОПТИЧЕСКИЙ ТРАКТАТ

О ГРАДАЦИИ СВЕТА

ПЕРЕВОД  
Н. А. ТОЛСТОГО и П. П. ФЕОФИЛОВА  
РЕДАКЦИЯ, СТАТЬИ И КОММЕНТАРИИ  
ПРОФЕССОРА  
А. А. ГЕРШУНА



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР  
1950



## ОЧЕРК ЖИЗНИ И ТРУДОВ ПЬЕРА БУГЕРА

### 1. Биография Пьера Бугера

Пьер Бугер родился 10 февраля 1698 г. в городе Круазик в Нижней Бретани.

Чтобы нагляднее охарактеризовать историческую эпоху, в которую жил Бугер, отметим, что в год его рождения двадцатипятилетний Петр Первый был в Англии, где изучал кораблестроение, и, предположительно, встречался с другим замечательным человеком того времени — Исааком Ньютоном, которому было уже пятьдесят шесть лет.\*

Во Франции это был „век Людовика XIV“ — мрачное время абсолютизма. Земледельцы, составлявшие подавляющее большинство населения страны, находились в состоянии крайней нищеты и угнетения. В это время уже начинался упадок абсолютной монархии, разрушались феодальные отношения, вызревал капиталистический уклад. Франция боролась за морское и колониальное преобладание. Экономическому и политическому развитию сопутствовали рост естественно-научного мышления, борьба за свободу мысли. Роль Франции среди других стран в политике, науке и искусстве была велика.

Бретань — родина Бугера — полуостров, образующий крайний северо-западный угол Франции, клином выдвинувшийся

\* Акад. С. И. Вавилов. Исаак Ньютон. Второе издание. Изд. Академии Наук СССР, 1945.

в Атлантический океан. Суровая по природе и географически обособленная эта часть Франции сохранила и по настоящее время много своеобразного. В ее жизни особо большую роль играло и играет море, и с морем неизменно были связаны научные интересы Бугера.

В портовых городах побережья Бискайского залива проекли детство и юность Бугера. Круазик, в котором он родился,— маленький приморский городок, расположенный у северной оконечности устья Луары, в 25 км севернее города Сен-Назер. Теперь Круазик административный центр кантона в департаменте Нижней Луары и в нем проживает около 2500 жителей. В XVIII в. Круазик оказал героическое сопротивление англичанам во время Семилетней войны.

Родители Пьера Бугера — Франсуаза Жоссо и Жан Бугер. Влияние отца на формирование творческого гения сына было исключительно велико. Жан Бугер был „королевским профессором гидрографии“ в Круазике. Такое звание соответствовало во Франции должностным лицам на морской службе, руководящим в коммерческих портах курсами по подготовке к экзаменам будущих капитанов дальнего и каботажного плавания. Отметим, что гидрографическое училище в Круазике продолжало существовать и до последнего времени.

Но Жан Бугер был не только одним из наиболее выдающихся, для своего времени, знатоков теории и практики морского дела, а и ученым, искушенным в особенности в физико-математических науках, чем не отличалось большинство его коллег. Написанный им полный курс навигации выдержал два издания. Первое вышло в 1698 г., в год рождения Пьера, второе — в 1706 г.\*

В должном соответствии с наименованием, написанный им трактат был действительно исчерпывающим по полноте, он заслужил всеобщую положительную оценку и получил широкую

---

\* *Traité complet de la Navigation. Par le Sieur Bouguer, Professeur Royal d'Hydrographie. A Paris, 1698, in 4°.*

известность. Как писал живший в XVIII в. автор многотомной истории точных наук Жан Монтюкла: „курс столь хороший, сколь позволяло состояние навигации в ту эпоху“.\* Отметим, что этот курс был в дальнейшем полностью переработан и значительно дополнен Пьером Бугером и издан им в 1752 г. Жан Бугер читал также курс математики.

Отец скончался, когда Пьеру было 15 лет, т. е. примерно в 1713 г.

Первые слова, которым внимал юный Пьер, и первые предметы, представлявшиеся его взорам, относились к морскому делу, астрономии и гидрографии, и язык этих наук стал с ранних лет его родным языком. Уроки и наставления отца не могли не способствовать развитию врожденных талантов мальчика.

Пьера отдали (повидимому в возрасте около десяти лет) учиться в иезуитский коллегиум в Ванне, в портовом городе, расположенном несколько севернее его родного Круазика. Следует напомнить, что в то время почти все образование во Франции было в руках католического духовенства, уделявшего в своих интересах исключительное внимание педагогической деятельности. Иезуитские коллегиумы были закрытыми учебными заведениями с интернатами, срок обучения в них исчислялся шестью годами, причем первым классом считался самый старший.

Автор посвященного памяти Бугера „Похвального слова“, произнесенного в Академии в Париже после кончины Бугера, приводит следующие примеры, характеризующие талантливость мальчика.

Когда Пьеру было одиннадцать лет и он учился в пятом классе, учитель решил испытать его математические способности. Удостоверившись в них в полной мере, он предложил Бугеру, чтобы тот сам преподавал ему математику. Пьер согласился. Учитель же обучал его литературе.

\* J. Montucla. *Histoire des Mathématiques* (Париж, 1798).

Через два года мальчику представился другой случай доказать свои способности. Один из преподавателей математики выдвинул мало обоснованное математическое положение. Пьер, тогда ученик третьего класса, дерзнул его опровергнуть. Математик почувствовал себя оскорблённым и, будучи уверенным в своем превосходстве над мальчиком тринадцати лет, пренебрежительно вызвал его на диспут, предполагая, что он не примет этот вызов. Однако Пьер публично сразил своего противника и принудил его к молчанию. Этот успех победителя был столь чувствительным для побежденного, что тот, как говорит автор „Похвального слова“, не смог перенести стыда и покинул город.

Бугер еще не кончил обучения, когда умер отец, оставив ему и брату более чем скромное состояние. К счастью, глубокие и широкие знания Бугера дали ему достаточно оснований занять должность, исполнявшуюся раньше отцом. Но удалось это ему, однако, с трудом. Королевский профессор гидрографии Обер, назначенный министром в качестве экзаменатора, устрашился юности Бугера и вначале отказывался его выслушать. Действительно, можно ли было доверить такую должность ребенку пятнадцати лет? Пьер убеждал его, что ученость не знает возрастного ценза, и просил экзаменовать его и притом со всей строгостью, не допуская никаких скидок на несовершеннолетие. Обер, в конце концов, согласился. Юный кандидат настолько удовлетворительно отвечал на все вопросы и выявил при этом такие способности, что ушел с экзамена, выслушав много похвальных слов своего экзаменатора, и вскоре получил испрашиваемую должность.

Несмотря на все дарование Бугера, ему, конечно, было более чем трудно исполнять ее. Его ученики были, почти поголовно, старше своего учителя. Однако молодой преподаватель вносил в свои лекции столько мастерства и вместе с тем достоинства, что скоро снискал себе уважение и привязанность учеников. Он обладал искусством заставлять людей любить свои обязанности и добровольно их выполнять.

Все свободное от преподавания время, а его оставалось немного, Бугер отдавал науке — физике, астрономии и морскому делу.

Его лекции и изыскания постепенно стали привлекать к себе все больше внимания. В Анжере, куда ездил Бугер, он познакомился с влиятельным академиком Рейно. Последний проявил к нему большое участие. Он рассказал о юном провинциальном математике своему другу академику Мерану (1678—1771). Меран — физик и математик — в 1734 г. был избран почетным членом Академии Наук в Петербурге.\*

Меран своими трудами и личным участием сыграл существенную роль в научном становлении Бугера. Именно его работы привлекли внимание молодого ученого к вопросам фотометрии.

Меран опубликовал в 1721 г. в мемуарах Парижской Академии свой доклад, в котором поставил вопрос о влиянии потерь света в атмосфере на количество тепла, поступающего к земле от солнца летом и зимой.

Меран указал, что при суждениях о количестве тепла от солнца нельзя ограничиваться учетом различия в угле падения солнечных лучей на землю. По свидетельствам историков науки, это обстоятельство ускользало от также интересовавшегося этим вопросом английского астронома Галлея (1656—1742), прославившегося своими изысканиями о кометах. Меран считал необходимым принимать во внимание, что зимою, при низком солнце, лучи его пронизывают большую толщу атмосферы, чем летом, когда солнце высоко. Меран поставил перед физиками казавшуюся неразрешимой в то время задачу

---

\* Б. Л. Модзалевский. Список членов Императорской Академии Наук 1725—1907. СПб., 1908.

Деятельность Мерана очерчена в книге: J. Bertrand. L'Académie des sciences et les académiciens de 1666 à 1793. Paris, 1869. В этой же книге можно почерпнуть и некоторые данные о жизни Пьера Бугера.

об оценке прозрачности атмосферы путем сопоставления света от солнца при разных его высотах, например в зимнее и летнее солнцестояние.

Эта задача привлекла внимание Бугера. Вот что он пишет по этому поводу в предисловии к своей первой книге по фотометрии „Опыт о градации света“ [4]:\*

„Прочтя этот мемуар с тем вниманием, коего не могут не заслуживать все труды, вышедшие из рук этого знаменного академика, я не смог более сдержать желание изыскать некоторые способы, дабы произвести указанные им измерения. Г-н де Меран высказывался о них лишь предположительно, поскольку он не говорит о них в своем сочинении; он отмечает, однако, ссылаясь на г-на Гюйгенса, что ежели они и будут крайне трудны, то все же мы не вправе отчаиваться в их успехе. Это и побудило меня произвести попытку измерить силу света от Луны при двух различных ее возвышениях; привлеченный после того простотой метода, на коем я остановился, я изыскал ему другие приложения...“.

Так возникла первая работа Бугера. В разделе „Истории Академии наук“ за 1726 г., посвященном различным наблюдениям по общей физике, содержится изложение результатов исследования по „сравнению силы света Солнца, Луны и многих свечей“ [1]. Бугер решил задачу сопоставления освещения от небесных светил путем применения свечей в качестве источника света сравнения.

Фотометрии посвящены и первая работа Бугера и его последний бессмертный труд „Оптический трактат“, который он сдал в печать уже за несколько дней до своей кончины. Вопросы измерения света интересовали Бугера на протяжении всей его жизни, и именно за постановку и разрешение их ему, пожалуй, больше всего признательно человечество.

---

\* Цифры в квадратных скобках обозначают порядковые номера по списку, печатных трудов Бугера (стр. 401).

Первая работа Бугера была опубликована им только в двадцативосьмилетнем возрасте. Это был результат его оторванности от столицы, Академии Наук, от всей научной жизни Франции. Должность преподавателя гидрографии в маленьком городке ограничивала круг его деятельности.

Меран сыграл определенную роль и в появлении следующего труда Бугера, посвященного морскому делу. Рейно рассказал Мерану о вызвавшей его восхищение работе Бугера по мачтовому оснащению кораблей. Меран выразил пожелание ознакомиться с ней. Прочитав ее, он предложил своим товарищам по Академии, которые вместе с ним должны были устанавливать премиальную тему на 1727 г., объявить конкурс на лучшее исследование по искусству ставить мачты на кораблях, поскольку на эту тему можно было ожидать представления великолепного труда.

Сочинение двадцатидевятилетнего Бугера получило награду Академии и вызвало единодушное одобрение математиков [2]. Меран дал самый похвальный отзыв этому труду и изложил его содержание в письме, опубликованном в „*Jurnal des Savants*“ за 1728 г.

За первым успехом Бугера последовали другие. Он получил награды Академии за сочинения: в 1729 г. на тему о наилучшем способе наблюдать в море высоты светил [3] и в 1731 г. на тему о наиболее пригодном способе наблюдать в море склонение магнитной стрелки компаса [5].

Первые его работы и окружавшая обстановка определили круг основных научных интересов Бугера на всею его жизнь. Это — фотометрия, астрономия и ее приложения, морское дело.

В 1729 г. вышла книга Бугера „Опыт о градации света“ („*L'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière*“) [4]. Этот труд может рассматриваться, с одной стороны, как развитие работы 1726 г., а с другой,— как первое издание его оптического трактата, вышедшего посмертно в 1760 г. и охватывающего значительно более широкий круг вопросов. В первом

разделе книги 1729 г. описываются предложенные Бугером способы измерения света и их применения, в частности, к сопоставлению света солнца и луны, измерению потерь света при его прохождении через атмосферу и морскую воду. Второй, третий и четвертый разделы книги посвящены установлению экспоненциального закона ослабления света при его прохождении через поглощающую среду и рассмотрению следствий из этого закона. В последнем, пятом, разделе книги этот закон применяется к случаю прохождения света через среду с неравномерной плотностью и, в частности, через атмосферу.

На последних страницах книги приведена таблица воздушных масс, пронизываемых светом небесных тел при разных их возвышениях, и вызываемого этими массами ослабления света.

„Оптический трактат“ 1760 г. значительно шире по содержанию, чем „Опыт о градации света“ 1729 г., но и в этой первой книге уже заложены основные положения фотометрии. Особое значение имеет установленный Бугером закон ослабления света, который, как показали прошедшие столетия, занимает в сокровищнице человеческих знаний существенное место как один из особо важных и наиболее общих законов природы.

Физический гений Бугера полностью проявился в этом труде, содержащем описания весьма тонких и совершенно новых для того времени экспериментов. Книга Бугера свидетельствовала об умении ее автора сочетать искусство наблюдения и науку анализа результатов наблюдений.

В 1730 г. Бугер был переведен из Круазика королевским гидрографом в Гавр — крупный порт у устья Сены. В дальнейшем должность королевского гидрографа в Круазике была достойно замещена братом Пьера Бугера, также, повидимому, талантливым человеком, поскольку его лекции и публичные доклады привлекали в этот город большое число желающих обучаться молодых людей.

После столь многих и общепризнанных доказательств своих исключительных научных способностей Бугер мог рассчитывать на внимание Академии. Переезд в Гавр приблизил его к Парижу, и 5 сентября 1731 г. Академия наук вводит его в свой состав со званием *associe* — геометра, на вакантное, после перевода Монпертона в члены-пенсионеры Академии, место.\*

Как пишет автор „Похвального слова“, никогда академик не был более точен в исполнении своего долга перед Академией и народом, и пребывание Бугера в Гавре, вне Парижа, сказывалось только на его посещениях заседаний. Бугер, войдя в состав Академии, представляет ей прекрасные мемуары по астрономии, механике, строительному делу [6—11].\*\*

В связи с мемуаром 1734 г. на конкурсную тему о причине наклона планетных орбит к солнечному экватору необходимо отметить следующее. Во времена Бугера еще шла острая борьба между сторонниками Ньютона и картезианцами — приверженцами мировоззрения Декарта, разделившая ученый мир на два враждебных лагеря.

Сущность астрономической теории Декарта образно изложена в книге Фонтенеля, переведенной на русский язык под

\* „Пенсионеры составляли основное рабочее ядро Академии; среди них было по три геометра, астронома, механика, анатома, химика и ботаника, секретарь и казначай. Следующую группу составляли двадцать *associes* („присоединенных“), а именно по два на каждую из указанных шести секций“. (Из статьи Н. И. Идельсона в книге: Клеро. Теория фигуры Земли. Изд. Академии Наук СССР, 1947).

\*\* 1731 г. — „О криволинейном движении тел в движущихся средах“ [6].

1732 г. — „О новых кривых, которые можно именовать линиями преследования (lignes de poursuite)“ [7].

1733 г. — „Об ударе жидкости“ [8].

1734 г. — „О кривых линиях, пригодных для образования купольного свода“ [9].

1734 г. — „Сравнение двух законов, которым Земля и другие планеты должны подчиняться в отношении фигуры, которую их заставляет принимать силу тяжести“ [10].

1734 г. — „Беседы о причине наклонности орбит планет“ [11].

наименованием „Разговоры о множестве миров господина Фонтенеля, Парижской Академии наук секретаря“ знаменитым впоследствии сатириком Антиохом Кантемиром.\*

Приведем описание Декартовых вихрей по Фонтенелю: „Планеты несутся по небесному веществу, которое есть чрезмерно тонко и двигательно. Все сие собрание небесного вещества, от солнца до звезд неподвижных, ворочается вокруг, и, таща с собою все планеты, побуждает их двигаться одним образом около солнца, которое пребывает в центре... И самое солнце около себя самого ворочается, понеже находится оно в самой средине того небесного вещества. Таков-то есть великий вихрь, которого солнце есть яко господин; но между тем планеты составляют себе маленькие партикулярные вихри, подобные вихрю солнечному. Всякая из тех планет, обращаясь около солнца, ворочается и около себя самой, и понуждает около себя ворочаться, тем же образом и на ту же сторону, часть некую вышеупомянутого небесного вещества“.

Теория всемирного тяготения Ньютона нанесла смертельный удар картезианским воззрениям, но во времена Бугера, особенно во Франции, борьба эта еще далеко не была завершена. Вот что писал по этому поводу акад. А. Н. Крылов:

„В настоящее время Декартова теория вихрей не только совершенно оставлена, но и совершенно забыта в физике; во времена же Ньютона и еще лет двадцать после его смерти ее упорно придерживались, в особенности Парижская Академия наук. Предложив, например, на премию вопрос о теории приливов, она, разделяя в 1740 г. эту премию между сочинениями Даниила Бернулли, Маклорена и Эйлера, строго математическими и основанными на законе тяготения, присоединяла к ним и сочинение иезуита Cavaleri, основанное на карте-

---

\* Проф. Б. Е. Райков. Очерки по истории гелиоцентрического мировоззрения в России. Второе издание. Изд. Академии Наук СССР, 1947.

зианских воззрениях, мотивируя свое решение тем, что Академия не признает возможным отдать предпочтение которой-либо из двух систем — Ньютоновой или Декартовой".\*

Ньютон показал, что теория Декарта, согласно которой кометы и планеты переносятся вокруг солнца вихрями, противоречит фактам, в частности наблюденным эксцентриситетам орбит и закону Кеплера. Бернулли в работе „Новые размышления о теории Декарта“, удостоенной в 1730 г. премии Академии, показывает, что при некоторых предположениях (сочетание вращения вихря с колебанием, изменение плотности вещества вихря обратно пропорционально корню квадратному расстояния от центра) можно удовлетворить наблюденным фактам и исходя из теории Декарта. С возражениями Бернулли выступают Деламбер и Бугер. Бугер в своем мемуаре 1734 г. [11], не ограничиваясь возражениями чисто математического характера, в частности оспаривая устойчивость такого вихря, пишет следующие замечательные слова:

„Если дело касается вихрей, один предположит эфир более плотным у центра, другой, пытаясь объяснить какое-нибудь явление, придает эфиру большую плотность у периферии, третий придет к выводу об одинаковой плотности всех слоев. ... И после этого, снабдив объяснениями все на свете, вы увидите с удивлением, что на деле ровно ничего не объяснено, и будете вынуждены стать в конце концов ньютонианцами".\*\*

Заметный след в истории науки оставил также второй из представленных Бугером в 1734 г. мемуаров, а именно о форме, которую должны были принять земля и другие планеты под влиянием силы тяжести [10]. Эта работа посвящена необходи-

\* Примечание 4 акад. А. Н. Крылова к книге 1 „Математических начал натуральной философии“ Ньютона (Петроград, 1915).

\*\* А. Д. Люблинская. К вопросу о влиянии Ньютона на французскую науку. „Исаак Ньютон“ — сборник статей под редакцией акад. С. И. Вавилова. Изд. Академии Наук СССР, 1943.

мым и достаточным условиям равновесия вращающейся жидкой фигуры, — вопросу, который привлекал внимание многих крупнейших ученых, в том числе Гюйгенса и Ньютона, и который получил окончательное и строгое разрешение в трудах А. М. Ляпунова. Для характеристики значения мемуара Бугера достаточно отметить, что именно он побудил Клеро (1713—1765) провести изыскания, приведшие к его классическому труду „Теория фигуры Земли“. В этой книге Клеро следующим образом характеризует сущность работы Бугера:

„Этот искусный геометр, занимаясь определением фигуры планет в предположениях гораздо более общих, чем это делалось до него, нашел, что в бесконечном множестве случаев фигура, получаемая из условий равновесия всех столбов жидкости от центра до поверхности, не совпадает с фигурой, необходимой для того, чтобы поверхность во всех ее точках пересекалась перпендикулярно направлением силы тяжести“.

В трактате Клеро и приложениях к русскому его переводу, составленных Н. И. Идельсоном, можно найти и краткое изложение и оценку рассматриваемого мемуара Бугера.\*

Пребывание Бугера вне Парижа могло явиться непреодолимым препятствием к его переводу в члены-пенсионеры Академии, то есть в ее основное рабочее ядро. Однако все же он очень скоро, предположительно в 1735 г., перешел в основные члены Академии, став в тридцать семь лет ее астрономом-пенсионером, и это произошло в связи с обстоятельством, сыгравшим чрезвычайно большую роль в жизни Бугера.

Академия наук в Париже решила отправить научные экспедиции, одну — к экватору, другую — к полярному кругу, с заданием измерить длину градуса меридиана, чтобы узнать, как

---

\* А. Клеро. Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики. Комментарии и редакция Н. И. Идельсона. Серия „Классики науки“. Изд. Академии Наук СССР, 1947, стр. 19, 63, 249, 269.

отклоняется форма земного шара от сферы. Но в это время один из академиков, который должен был войти в экваториальную экспедиционную группу, опасно и надолго заболел. Его нужно было заменить, и выбор Академии и морского министра графа де-Морепа, влиятельного покровителя наук и, в частности, намечаемых геодезических экспедиций, пал на Бугера. Учитывая научные заслуги Бугера и желая компенсировать его за необходимость оставления должности гидрографа, ему было присвоено высокое звание астронома-пенсионера. Так, войдя в основной состав Академии, Бугер вместе с тем на длительный срок покидал Францию.

Намечавшиеся экспедиции глубоко волновали весь ученый мир и привлекали к себе широчайшее общественное внимание. Какова форма земли, насколько она отлична от сферы, сжата ли она у полюсов или у экватора и насколько? Интерес к этому вопросу определялся даже не столько естественным стремлением знать форму того тела, на котором обитает человечество, сколько тем, что в глазах современников предстоящие геодезические измерения были своеобразным *experimentum crucis*, который должен был или утвердить ньютонианскую систему мира, окончательно сокрушив картезианскую, или показать неправильность космологии Ньютона, основанной на действии сил тяготения. Это был не только общий вопрос физики, механики и математики, но и вопрос мировоззрения, философии.

Рассматривая огненно-жидкую землю как единственную в пространстве врачающуюся жидкую массу, части которой притягивают друг друга и на которые действует центробежная сила, возрастающая от полюса к экватору, Ньютон пришел к выводу, что земля должна была принять форму сферида, сплюснутого у полюсов, и рассчитал, насколько полярный диаметр земли должен быть короче экваториального. Работами других ученых и по преимуществу Клеро теория формы земли, построенная, исходя из действия сил всемирного тяготения, была значительно усовершенствована. Из Декартовой теории вихрей

следовало обратное, а именно, что земля ската по экватору. О форме земного сфероида, очевидно, можно было судить по изменению с широтою кривизны земного меридиана или, иначе говоря, по изменению с широтою длины одного градуса меридиана.

Если прав Ньютон, длина градуса земного меридиана должна возрастать при переходе от экватора к полюсу. Результаты измерений астрономов Кассини, произведенные во Франции вдоль Парижского меридиана, противоречили теории Ньютона; как окончательно выяснилось в дальнейшем, это было обусловлено тем, что малое расстояние точек по широте вызывало, при несовершенстве инструментария того времени, несобразно большую погрешность. Однако французские ученые отстаивали точность своих измерений. Среди них было мало таких последовательных ньютонианцев, как Бугер или Вольтер, который наносил беспощадные удары своим соотечественникам картезианцам. Англичане, ссылаясь на Ньютона и на наблюдения над маятниками, показавшие, что сила тяжести возрастает от экватора к полюсам, подвергали результаты французских измерений законному сомнению. Для решения затянувшегося спора, столь важного для науки и обостренного национальными чувствами, очевидно следовало провести новые, независимые измерения градусов долготы в столь разных широтах, чтобы расхождение отчетливо выявилось при точности измерений того времени.

Поэтому Академия и решила провести измерения в возможно далеко отстоящих по широте точках земного шара.

Несмотря на войны, которые вели Франция, было разрешено отправить две экспедиции и санкционировано предоставление необходимых средств. Одна экспедиция была направлена в экваториальную Америку, в Перу; другая — на крайний север, в Лапландию.

Для экспедиций были специально изготовлены первоклассные по тому времени приборы, необходимые для измерения расстояний при триангуляционных работах и проведения парал-

лельных астрономических обсерваций. Каждая экспедиция брала с собой один из двух изготовленных железных, полиро-ванных жезлов по одному туазу длиною, чтобы обеспечить единство мер.

Отметим, что „перуанский туаз“, которым пользовался Бугер и другие участники южной экспедиции, служил основным эта-лоном при установлении позднейших, в том числе метрических, мер длины.

В начале, в 1735 г., отправилась в многолетнее путеше-ствие южная группа. „Полярники“ выехали в 1736 г. к Се-верному полярному кругу, в Лапландию. Эту экспедицию воз-главил знаменитый математик Пьер-Люи-Моро де-Мопертюи (1698—1759); в ее состав входили в числе других Клеро, Камюс, Лемоннье и присоединившийся к ним в Стокгольме Цельзий, занимавший должность профессора астрономии в Уп-сале. Эта экспедиция оказалась весьма краткой; участники ее вернулись через 15 месяцев, подтвердив своими изме-рениями теорию Ньютона. Они первые были согреты лучами славы. Как сказал Вольтер: „Мопертюи приplusнул и землю и Кассини“.

Обратимся к южной, перуанской группе. В ее состав вошли три академика: Бугер, де-ла-Кондамин (1701—1774), Годен (1704—1760), а также ботаник и доктор Жюссье (1704—1779), хирург Сенъерг, один морской инженер, один часовщик и еще несколько лиц. Эта группа выехала из Франции в 1735 г., ее изыскания заняли много лет. Большинство ее участников вернулось во Францию в 1742 г.; Бугер, пропутешествовав 9 лет, возвратился в 1744 г., де-ла-Кондамин в 1745 г., Жюссье — в 1771 г., пробыв в Перу 36 лет.

Ученые путешественники избрали местом измерений до-ливу реки Квито в Перуанских Кордильерах Южной Аме-рики, пересекающую почти под прямым углом экватор. Долина расположена вблизи города Квито (правильнее Кито), тел-решней столицы республики Эквадор, которая тогда входила в пределы перуанского вице-королевства — земли дружествен-

ного испанского короля. До захвата в середине XVI в. испанцами город Квито был столицей государства инков.

Экспедиция погрузилась в Ла-Рошелли (порт на побережье Бискайского залива) на корабль, который отчалил 16 мая 1735 г. Корабль под парусами сравнительно быстро пересек Атлантический океан, прошел остров Мартиника и в середине июля достиг порта Санто-Доминго на острове Гаити, тогда французской колонии. Экспедиции еще предстояло трудное и долгое сухопутное путешествие, чтобы достичь расположенного у противоположного, тихоокеанского побережья Перуанского вице-королевства. Перевалив через Дариенский хребет, расположенный в южной части Панамского перешейка, по теперешней границе между Панамой и Колумбией, экспедиция прибыла в Лиму, столицу Перу, лишь в мае 1736 г., т. е. через год после выезда из Франции.

Город Квито расположен почти на экваторе ( $0^{\circ}14'$  южной широты), на высоте 2900 м над уровнем моря, на горном плато, у подножья действующего вулкана Пичинша. Климат в районе Квито прохладный и ровный, там всегда весна.

Экспедиция проложила в раскинувшейся по меридиану долине реки Квито цепь из 32 треугольников, протянувшуюся более чем на  $3^{\circ}$ . Большая длина дуги должна была способствовать точности измерений. На опорных точках был воздвигнут ряд пирамид.\* Крайний северный пункт ( $0^{\circ} 2' 30''$  северной широты) был расположен около города Квито, крайний южный ( $3^{\circ} 4' 30''$  южной широты) — около города Куэнка. Расстояние между этими точками было возможно точно найдено в результате триангуляционных измерений, а разность широт определена из одновременных астрономических наблюдений в этих пунктах. Это позволяло вычислить длину градуса меридиана у экватора. В Квито астрономические наблюдения вел Бугер, в Куэнка — де-ла-Кондамин.

\* De la Condamine. *Histoire des Pyramides de Quito*. Paris, 1751.

Решение поставленной задачи требовало много мужества от ее участников. Трудно было производить триангуляционные работы в горных условиях, — ведь самая низкая точка триангуляции была на высоте около 2.5 км. Мешали и нападения индейцев. Последние часто разрушали тригонометрические знаки, так что на одной точке их пришлось возобновлять семь раз. Жизнь путешественников подвергалась опасности и во время труда и в немногие часы отдыха. Так, например, 29 августа 1739 г. во время боя быков в Куэнка, повидимому в результате подстрекательства местной администрации, произошло массовое нападение зрителей на присутствовавших французских академиков и их спутников. Упомянутый выше участник экспедиции хирург Сеньерг умер от ран через четверо суток. Бугер был сбит с ног камнем, едва избежал удара шпаги.

Обо всем живописно и с приложением гравюры и выдержек из ряда документов повествуется в „Письме госпоже\*\*\* о народном мятеже, возбужденном в городе Куэнка в Перу 29 августа 1739 г. против членов Академии наук, посланных для измерения Земли“.\*

Несмотря на все трудности, измерения были успешно завершены и вместе с работами Лапландской экспедиции и новыми измерениями в самой Франции, произведенными под руководством Кассини и астронома де-ла-Кайля, друга Бугера и впоследствии издателя его трактата, окончательно установили сжатие земного шара и определили точно степень этого сжатия.

\* „*Lettre à Madame\*\*\* sur l'émeute populaire exoiteé en la ville de Cuenca de Perou, le 29 d'Août 1739 contre les Académiciens des sciences, envoyés pour la mesure de la Terre*“, 1746; Pièces justificat. pour servir de preuve a la plupart des faits allégues dans la lettre précédente, 1745.

Встречаются указания, что автором этого сочинения является Бугер. Однако это не так, поскольку в тексте имеется фраза: „я и г-н Бугер“ Возможно, что автором является де-ла-Кондамин.

Для длины  $1^{\circ}$  меридиана были получены следующие данные:

Лапландия . . . . .	57 422	туаза
Франция . . . . .	57 084	"
Перу . . . . .	56 748	туаз

Работы экспедиции не ограничивались градусными измерениями. Об этом убедительно свидетельствуют мемуары, пересланные Бугером во Францию за годы экспедиции.

Бугером и да-ла-Кондамином были проведены наблюдения над маятником. Маятником служила свинцовая чечевица, подвешенная на нити из алоэ. Период колебания определялся путем одновременного наблюдения взятых из Франции астрономических часов, что позволяло найти ускорение силы тяжести. Этому вопросу посвящен пересланный Бугером в Париж мемуар „О длине маятника в жарком поясе“ [12].

Бугером было выполнено также исследование, которое можно рассматривать как один из истоков гравиметрии. Изложим вкратце его сущность, следуя В. Витковскому.\* Бугер экспериментально показал, что местные притяжения, например гор, сказываются на направлении силы тяжести. Мысль о возможности обнаружения непосредственным наблюдением отклонения отвесной линии притяжением горы была высказана еще Ньютоном, но первое действительное измерение этого рода было выполнено Бугером. Он избрал две точки, лежащие на одной параллели к югу от потухшего вулкана Чимборазо, одной из величайших гор мира (ее высота 6272 м над уровнем моря). Одна точка была выбрана на меридиане, проходящем через предполагаемый центр тяжести этой горы, другая — значительно западнее. Произведенные наблюдения и вычисления показали, что хотя обе точки и лежат на одной параллели сфера, однако их астрономические широты вследствие притяжения горы различаются почти на  $8''$ . На такой угол отклонялся отвес в сторону к горе, когда Бугер проводил наблюдения на ее склоне [22].

\* В. Витковский. Практическая геодезия. СПб., 1898.

Формула Бугера для редукции силы тяжести служит и поныне.\*

Оценка дальности видимости покрытой снегами вершины Чимборазо позволила Бугеру выполнить расчеты воздушной дымки и рассеяния света воздухом. Об этом он пишет в пятом разделе третьей книги оптического трактата [36].

Бугер совершает с барометром ряд восхождений на наиболее высокие из доступных вершин Перуанских Кордильер для того, чтобы изучить изменение давления с высотой. После этого он спускается к Тихому океану и проводит полтора месяца на пустынном острове, с которого он измеряет высоты над уровнем моря тех вершин, на которых он проводил наблюдения. Это позволяет Бугеру дать способ определения высоты гор, который он попутно излагает в своем оптическом трактате. Повидимому, Бугер был первым исследователем, практически применившим барометрическую формулу Галлея.

Бугера можно признать хорошим альпинистом. Он совершил восхождение на Чимборазо, хоть и не на самую вершину (первое восхождение удалось в 1880 г.), но все же на высоту свыше 4.5 км. Еще замечательнее то, что на вершине горы Пичинша Бугер пробыл три недели, проводя измерения барометром и термометром, а высота этой горы, по измерениям Бугера, 2430 туаз над уровнем моря, то есть около 4.7 км.

Бугер определял высоту облаков, внимательно изучал высоту линии вечных снегов.

На высокогорные измерения Бугера ссылается М. В. Ломоносов в своих сочинениях: „О морозе, случившемся после теплой погоды в апреле месяце сего 1762 г.“ и „Прибавления к экспериментальной физике“.<sup>\*\*</sup>

\* Н. Идельсон. Теория потенциала и ее приложения к вопросам геофизики. Гос. техн.-теор. изд., 1932.

\*\* М. В. Ломоносов, Сочинения, т. VI. Изд. Академии Наук СССР, 1934.

Бугер проводит ряд наблюдений астрономической и земной рефракции, сопоставляя рефракцию в тропических и умеренных широтах, определяя ее на разных высотах, изучая миражи. По этому вопросу Бугер посыпает мемуар [14] в Парижскую Академию наук и создает в дальнейшем весьма полезную для астрономии теорию рефракции; в числе его последователей могут быть названы Эйлер, Ламберт, Брадлей, Боскович, Лагранж.

Предметом отдельного мемуара [15] являются наблюдения Бугера над расширением и сжатием металлов; наблюдениям способствовали резкие перепады температуры в Кордильерах.

Бугер возвращается во Францию в июне 1744 г. и делает 14 ноября 1744 г. на открытом собрании Академии доклад, опубликованный впоследствии в мемуарах Академии, о результатах измерений в Перу. Экспедиционные работы служат также предметом его докладов в 1745 г.

Большой труд Бугера „Фигура Земли, определенная наблюдениями г. г. де-ла-Кондамина и Бугера“ выходит в 1749 г. [22]. Он посвящен описанию „многотрудных наблюдений астрономических и измерений геометрических“, как говорит М. В. Ломоносов, поминая этот труд в своем бессмертном сочинении „Первые основания металлургии или рудных дел“.\*

Приложением к книге Бугера является „Краткое повествование о путешествии в Перу, содержащее описание стран, в которых проводились наблюдения“. Оно включает следующие разделы: описание части Перу между океаном и большой цепью гор, именуемой Кордильерами; описание Перуанских Кордильер и ограничивающей ими местности в окрестностях Квито; заметки или отдельные наблюдения над природой почвы, землетрясениями, вулканами и т. д.; возвращение автора из Квито до Северного (Атлантического) океана рекою Магдалена; наблюдения над магнитом; обитатели Перу и их нравы.

---

\* М. В. Ломоносов, Сочинения, т. VII. Изд. Академии Наук СССР, 1934.

Отчеты Бугера о путешествии были интересны, но еще увлекательнее докладывал и писал о своих странствованиях де-ла-Кондамин, второй из руководителей Перуанской экспедиции.

Когда были закончены измерения, де-ла-Кондамин совершил весьма смелое по тем временам путешествие от Перуанского побережья Тихого океана до Гвианского побережья Атлантического океана, спустившись по Амазонке от ее верховий до устья, то есть проделав по реке путь свыше 4500 км. Это первое в истории научное путешествие по Амазонке. Де-ла-Кондамин описал его в сразу изданной им по возвращении в Париж книге.\*

Шарль-Мари де-ла-Кондамин — колоритная фигура. Его семья и он сам принадлежали к аристократической знати Парижа. Жизнь ему давалось легко, успех неизменно ему сопутствовал, будь то на светском, военном или ученом поприще. Он имел доступ к всесильным министрам, был членом Академии наук в Париже и Берлине, почетным членом Российской Академии Наук (избран в 1754 г.), другом Вольтера, состоял в переписке с М. В. Ломоносовым и русским академиком астрономом А. Н. Гришовым (1726—1760 гг.). Будучи астрономом, он в то же время занимался и весьма далекими от астрономии вопросами, как то: русской грамматикой, медициной и т. п. Он был неутомимым путешественником, умеющим интересно рассказать и описать свои наблюдения над горами и реками, фуной и флорой, людьми и их обычаями.

Де-ла-Кондамин не был все же столь крупным ученым, как Бугер. Известный физик Био, автор биографий Бугера и де-ла-Кондамина, так характеризует роль обоих в Перуанской экспедиции. Все, что касается создания приборов, выбора способов измерений, размещения приборов, подготовки и проведения точных измерений, должно быть приписано

\* *De la Condamine. Relation abrégée d'un voyage fait dans l'intérieur de l'Amérique méridionale. Paris, 1745.*

Бугеру. Однако для обеспечения возможности измерений нужно было преодолевать препятствия, чинимые местными властями, завоевывать симпатии жителей, относившихся с суеверной враждой к чужеземцам, надо было заставить себя уважать, преодолеть храбростью недоброжелательство, что блестяще и делал де-ла-Кондамин. В свободное от этих занятий время де-ла-Кондамин наравне с другими и не менее умело, чем они, участвовал в астрономических наблюдениях.

Франция и весь ученый мир восторженно встретили вернувшихся из путешествия Бугера и де-ла-Кондамина. Вольтер приветствовал их возвращение стихами, в которых воспевал героев физики, аргонавтов наших дней, которые переправились через горы, пересекли океан, громадный труд и точные измерения которых установили форму „изумленной земли“.

Путешествие в Перу, принесшее Бугеру заслуженную славу, вместе с тем стало и причиной его наибольших огорчений, столь серьезных, что, по мнению некоторых биографов, они укоротили его жизнь. Радость успешного завершения важного, тяжелого и опасного труда, потребовавшего девять лет жизни, была омрачена для Бугера тем, что оба руководителя Перуанской экспедиции, он и де-ла-Кондамин, привезли в Париж не только результаты совместных измерений, но и зародили взаимной неприязни, начавшейся с распри в годы экспедиции и сохранившейся в дальнейшем.\* Об этом свидетельствует, например, одно из писем Бугера Леонарду Эйлеру, хранящихся, как установил автор настоящей статьи, в Архиве Академии Наук СССР. В письме, датированном 11 июля 1754 г., то есть написанном спустя десять лет после возвращения из экспедиции, Бугер с горечью отмечает, что нельзя питать иллюзий о его взаимоотношениях с г-ном де-ла-Кондамином, что последний систематически искаивает истину. Горькие жалобы на де-ла-Кондамина содер-

---

\* T. Young. Life of de la Condamine (Biographies of men of science).

жатся также в письмах Бугера другому его знаменитому другу — Даниилу Бернулли.

Большая доля похвал за результаты экспедиции доставалась де-ла-Кондамину, и Бугер воспринимал эту несправедливость как результат того, что тот хочет присвоить себе его заслуги. Бугер нападал на де-ла-Кондамина, последний защищался и подвергал Бугера насмешкам; пререкания вылились в устные и письменные диспуты, приводившие Бугера в отчаяние и сильно отравившие последний, парижский период его жизни.

Путешествие, потребовавшее переходов через океан, еще больше усилило неизменный интерес Бугера к мореходному искусству, в результате чего в 1746 г. выходит труд Бугера „Трактат о корабле, его построении и его движении“ [18]. Над этим большим сочинением, объемом свыше 700 страниц большого формата, Бугер, как он отмечает в предисловии, работал в годы экспедиции в Перу, используя для этого все остававшееся свободным время.

Интересовался теорией корабля и друг Бугера — Леонард Эйлер (1707—1783), который в 1730 г. даже предполагал перейти лейтенантом в русский флот. На три года позже „Traité du Navire“ Бугера выходит в 1749 г. посвященная тому же вопросу „Scientia Navalis“ Эйлера. Бугер очень высоко оценил последнюю книгу, о чем свидетельствует датированное 20 марта 1751 г. письмо Бугера Леонарду Эйлеру.

Бугера следует считать одним из основоположников теории корабля. Вот что писал по этому поводу акад. А. Н. Крылов:

„В 1746 г. появилось в Париже сочинение Бугера «Traité du Navire», а в 1749 г. вышло в Петербурге присланное Эйлером из Берлина за несколько лет перед тем сочинение «Scientia Navalis» в двух громадных томах in 4°. Оба сочинения, написанные одновременно, одно в Перу, другое в Берлине, оказались по методу изучения вопросов и по результатам весьма близкими между собой. В них вполне устанавливается в применении именно к кораблю учение

о пловучести, остойчивости и ее измерении, вводится понятие о метацентре, развивается данное еще Ньютоном учение о сопротивлении жидкостей в применении к кораблю и к действию ветра на паруса и решается целый ряд других вопросов, относящихся к кораблю и его мореходным качествам.

„Сочинения Эйлера и Бугера показали, что исследования по теории корабля доставляют обширный материал для приложения математики и новых ее методов, которые тогда разрабатывались.

„... С 1753 г. Парижская Академия наук предлагает на конкурс целый ряд тем по теории корабля. В нем принимают участие Эйлер, братья Бернулли, Бугер, аббат Боссю и другие математики того времени. Имирабатываются приемы вычисления по чертежу элементов корабля и его остойчивости, указывается способ практического определения положения центра тяжести...“.\*

Отметим, в качестве примера, что слово „метацентр“, понятие о котором играет столь существенную роль в теории корабля, введено в науку Бугером.

В 1747 г. Бугер публикует описание новой конструкции глубоководного лага — прибора для измерения скорости хода корабля и пройденного им пути [19]. Употребляя обыкновенный и глубоководный лаги одновременно, можно было, не останавливая движения корабля, определять его скорость относительно неподвижной воды на большой глубине. Следует отметить, что на том же принципе, но другого устройства глубоководный лаг был придуман великим современником Бугера М. В. Ломоносовым.

Акад. М. А. Рыкачев (1840—1919) сопоставляет лаги Бугера и Ломоносова, разбирая речь Ломоносова „Рассуждение о большой точности морского пути“.\*\*

\* Акад. А. Н. Крылов, Собрание трудов, том IX. Теория корабля. Часть первая. Изд. Академии Наук СССР, 1948 г.

\*\* М. В. Ломоносов, Сочинения, т. V. Изд. Академии Наук СССР. 1902.

В 1748 г. Бугер дает описание изобретенного им гелиометра — зрительной трубы с двумя объективами для измерения малых углов на небесной сфере, например угловых диаметров планет [20]. Гелиометром, как показывает и самое его наименование, можно было измерять и угловой диаметр солнца.

Лаланд в письме Леонарду Эйлеру от 27 июня 1755 г. называет Бугера первым изобретателем этого инструмента, имевшего существенное значение в развитии астрономии. Ряд указаний о гелиометре Бугера можно найти также в письмах Леонарду Эйлеру от академика А. Н. Гришова. Вспомним, что именно при помощи гелиометра Бессель пытался впервые определить расстояние от неподвижной звезды до земли.

Перейдем к описанию последних лет жизни Бугера. Для изучения этого периода его деятельности весьма полезными смогут оказаться заслуживающие в дальнейшем издания письма Пьера Бугера Леонарду Эйлеру, хранящиеся в Эйлеровском наследии Архива Академии Наук СССР.\* Эти письма относятся к периоду 1751—1756 гг., их общее число 17. В них затрагиваются разнообразные вопросы оптики, астрономии, геодезии и метеорологии (в частности рефракции, земного электричества). В Архиве хранится также копия письма Бугеру академика А. Н. Гришова. Имя Бугера часто упоминается в письмах к Эйлеру Гришова, Лаланда, де-ла-Кайля, Клеро. В одном из писем Клеро пишет: „Г-н Бугер — один из наиболее почитаемых мною геометров“.

О внешнем облике Бугера в эти годы позволяет судить воспроизведенный в этой книге его портрет пастелью работы

---

\* Подлинные письма Пьера Бугера Леонарду Эйлеру от 20 марта 1751 г., 30 мая 1751 г., 4 июня 1751 г., 9 октября 1751 г., 2 апреля 1752 г., 14 июля 1752 г., 23 ноября 1752 г., 8 февраля 1753 г., 3 марта 1753 г., 28 сентября 1753 г., 8 апреля 1754 г., 2 мая 1754 г., 11 июля 1754 г., 19 ноября 1754 г., 1 мая 1755 г., 27 сентября 1755 г., 18 мая 1756 г. — Архив Академии Наук СССР, Фонд 136, опись 2.

Перроно (1715—1783) — известного французского живописца, одного из лучших пастелистов XVIII в.

Портрет с надписью по каталогу „Пьер Бугер — гидрограф“ хранится в картинной галлереи Лувра. Он сделан в 1753 г., то есть когда Бугеру было 55 лет, за пять лет до его кончины.\*

С 1751 г. по год кончины — 1758 г. — Бугер публикует ряд мемуаров по оптике, астрономии, механике, геодезии, навигации, свидетельствующих о разнообразии, а вместе с тем и о неизменности и целеустремленности его научных интересов.

Эти работы являются изложением докладов, которые он делал в Академии наук. Среди них мемуар „Замечания о способах измерения света с некоторыми применениями этих способов“ [34], работы по наблюдению параллакса Луны, по измерению длины градуса меридиана, по расширению воздуха, по штурманским выкладкам и управлению кораблем.

Один из мемуаров посвящен наблюдениям над длинным маятником [30]. Такие опыты в середине XVIII в. делались многими учеными, в том числе и М. В. Ломоносовом.

---

\* Приведем описание портрета. Бугер сидит в кресле, правая рука опущена в жилет, под левой треуголка. На нем отливающий разными оттенками светлолиловый кафтан и жилет того же цвета, но только более бледного. Отделкой одежды служат воротник из белого тонкого батиста с кружевным жабо и кружевные манжеты рукавов. На голове длинный напудренный парик. С лиловым косынком контрастирует желто-зеленый фон. Выражение лица суровое, черты резкие, как бы выбитые ударами топора, своеобразная линия рта, глаза серо-коричневые, отчеркнутые синим, цвет лица желчный, — возможно, уже сказывалось заболевание печени, от которого Бугеру суждено было скончаться. (L. Vaillat et P. Ratouis de Limaly. J. B. Perronneau, sa vie et son oeuvre. Paris, 1923).

Значительно более известна, чем портрет работы Перроно, сделанная с него гравюра в виде овального медальона в прямоугольной рамке. Гравюра была сделана в 1779 г. известным французским гравером и поэтом С. Миге (1736—1820).

вым. Таблица его наблюдений приложена к „Рассуждению о точности морского пути“ и в примечаниях к V т. сочинений М. В. Ломоносова Н. А. Любимов пишет о мемуаре Бугера следующее. Большинство ученых считало, — говорит он, — что длинный маятник, будучи оставлен в покое (а не совершая колебания, подобно маятнику Фуко), изменяет несколько свое положение с течением времени, и его отклонения от положения равновесия обладают преимущественным направлением и что это явление, называвшееся *reciprocatio penduli*, связано с общей системой мира. Другие ученые это явление отрицали. Споры изложены подробно в истории Парижской Академии наук за 1742 г. В 1754 г. Бугер делал многие опыты над длинным маятником и показал, что изменения в положении вертикального маятника не подчиняются никакомуциальному закону, зависят не от движения земли, а от второстепенных причин (свойств нити, внешних сотрясений, приводящих маятник в незаметные качания, и т. п.).

В 1757 г. выходит книга об изменении градуса меридiana между Парижем и Амьеном, написанная Бугером совместно с Кассини и другими авторами [35].

В 1753 г. издается его большой труд по морскому делу и книга „Новое сочинение по навигации, содержащее теорию и практику штурманского искусства“ [27]. История создания этого трактата следующая. Курс навигации королевского гидрографа Жана Бугера, отца Пьера Бугера, обладавший многими достоинствами и сослуживший большую пользу, будучи основным учебным руководством по мореплаванию, устарел, и оба его издания — 1698 и 1706 гг. — были к середине XVIII в. давно распроданы. Морской министр повелел Пьери Бугеру издать новое руководство по навигации. Бугер первоначально предполагал переиздать книгу отца, значительно ее переработав и дополнив, но при обстоятельном рассмотрении вопроса счел необходимым написать книгу заново. Это было вызвано, по словам Бугера, прежде всего большим развитием и уста-

новлением взаимной связи наук, которые были не столь еще совершенны при жизни его отца.

Трактат состоит из пяти книг. В первой из них в популярной форме изложены необходимые мореплавателям сведения по геометрии. Вторая книга содержит основы штурманского искусства, в ней говорится о фигуре и величине земли, о пользовании морской картой и компасом. Третья включает полезные мореплавателям данные по астрономии, а в книге четвертой показывается их применение в навигации. Пятая и последняя книга посвящена различным способам решения навигационных задач.

Руководство Бугера вышло в последующих изданиях на французском языке: в 1761 г. в сокращенном и несколько переработанном де-ла-Кайлем виде и в 1792 г. с дополнениями астронома Лаланда.

Новое руководство Бугера, повидимому, нашло наибольший отклик в России, что является одним из свидетельств высокого уровня морского обучения в России XVIII в. Эта книга имела значение в подготовке русских военных моряков XVIII и начала XIX вв., из которых вышло много великих флотоводцев и морских путешественников.

Книга Бугера не просто была переведена на русский язык, но подвергалась переработке и выдержала много изданий. Переводчиком ее и редактором был Николай Гаврилович Курганов (1726—1796) — русский ученый, астроном, сподвижник М. В. Ломоносова, профессор высшей математики и навигации в Морском корпусе, автор широко известной в свое время книги „Письмовник“. Напомним, что именно Курганов вместе с Красильниковым вели под руководством Ломоносова наблюдения за прохождением Венеры по диску солнца.

В „Уведомлении“ Н. Г. Курганов дает следующую оценку труда Бугера:

„Сочинитель сея книги господин Бугер есть королевской Парижской Академии наук, Брестской морской академии

и королевского Лондонского ученого собрания член, бывший королевским гидрографом при портах Кроазике и Гавр де-Грасе, который многими около половины сего столетия изданными от себя наипаче к приращению всея мореходных наук полезными книгами в свете славен...“.

В первом издании „Бугерово новое сочинение о навигации“ вышло в русском переводе в 1764 г.; титульный лист его воспроизведен в настоящей книге. Второе, исправленное издание вышло в 1785 г. под несколько видоизмененным названием: „Бугерово новое сочинение о навигации, содержащее теорию и практику штурманского искусства. Преложено с французского, и при сем выходе многое иное поправлено и дополнено Морского шляхетного кадетского корпуса математических и навигацких наук профессором Николаем Кургановым. В Санкт-Петербурге в типографии оного же корпуса вторым тиснением. 1785“.

В 1799 г. в Петербурге выходит третье издание сочинения Бугера, а в 1802 г. несколько сокращенное четвертое. Библиография русских переводов Бугера еще требует уточнения.

Несколько изданий выдерживает конспективное изложение труда Бугера. Приведем содержание титульного листа одного из изданий: „Определения вещам, содержащимся в новом Бугеровом сочинении о навигации с приложением некоторых нужных примечаний для употребления учащегося в морском шляхетном кадетском корпусе благородного юношества. В Санкт-Петербурге печатано вторым тиснением в типографии оного ж корпуса, 1775 года“.

В 1794 г. и впоследствии в 1801 г. издаются дополнения Н. Курганова к книге Бугера. Приведем текст заглавного листа издания 1794 г.: „Пополнения Бугеровой науки мореплавания. Часть первая, предлагающая таблицы склонения и прямого восхождения солнца, и многие иные астрономические, географические и физические познания, для употребления во флоте и в морских училищах. Издана от профессора

математических и навигацких наук и кавалера Н. Курганова. В типографии помянутого корпуса, 1794 г.“.

В предисловии к „Новому сочинению по навигации“ Бугер высказывает ряд замечательных по глубине суждений о связи между теорией и практикой, о преподавании. Приведем некоторые выдержки в переводе Н. Г. Курганова:

„Практика подобна руке, тогда действующей, когда теория вместо ума оною разумно управляет“.

„Теория должна всегда объяснять практику, а, напротив того, практика ничего не должна заимствовать от теории, чего бы в свою пользу употребить не могла“.

Отметим, что Бугер никогда не включал в свои сочинения ничего, что могло бы служить возвеличению автора, свидетельствуя об его учености, без прямой пользы читателю. Так и из сочинения по навигации Бугер тщательно исключил все, кроме необходимых прямых указаний штурманам, вытекавших из его широких и глубоких знаний и большого опыта.

За год до кончины Бугера, в 1757 г., появляется в свет его трактат об управлении кораблем [33]. В этом сочинении Бугер проводит вначале параллель между прошлым и современным ему состоянием мореходного дела, излагает необходимые для последующего рассмотрения принципы механики, обстоятельно применяет их к вопросам управления парусным кораблем.

Последние два года жизни Бугер почти целиком посвятил подготовке трактата об оптике, которому суждено было стать его лебединой песней.

Работа над перечисленными трудами, деятельность в Академии и в „Journal des Savants“ в издании которого он участвовал с 1752 г., поглощали все время Бугера после его возвращения во Францию.

Его день в основном занимал крайне напряженный и весьма систематический кабинетный труд, редким отдыхом от которого служили прогулки и беседы с друзьями. Самые

тесные узы дружбы и общих интересов связывали его с братом, и горе, испытанное им в последний год жизни из-за смерти брата, еще ухудшило его здоровье, подорванное чрезмерно напряженным трудом. Весною 1758 г. выявилось заболевание печени, болезнь прогрессировала, и все меньше надежд оставалось на ее преодоление. В июне Бугер уже был вынужден не посещать Академию, не покидать комнату. Хотя он и упал духом, но все же работал и вносил последние поправки в трактат о градации света.

В августе Бугер, несмотря на крайнее истощение, собрал оставшиеся силы, чтобы сесть в карету и отвезти своему издателю только что законченную перепиской набело рукопись. Он советовал последнему ускорить издание, если тот не хочет, чтоб труд был издан посмертно. Однако Бугеру не суждено было его увидеть. Через несколько дней после поездки, 15 августа 1758 г., он скончался в возрасте 60 лет и 6 месяцев. Его кончине была посвящена, насколько известно, книжка доминиканца Лабертония под наименованием „Повествование об обращении и смерти г-на Б.\*

В лице скончавшегося ранее брата Бугер потерял единственного близкого наследника, и приобретенное им скромное состояние он завещал друзьям и слугам, оставив значительную часть в пользу бедных.

Заботу об издании трактата об оптике Бугер доверил своему другу академику де-ла-Кайлю (1713—1762) — автору многочисленных работ по астрономии и геодезии, курса оптики, выдержавшего много издааний на французском и латинском языках. Как раз в это время (16 сентября 1756 г.) он был избран почетным членом Российской Академии Наук.

Смерть не позволила Бугеру полностью завершить подготовку рукописи трактата к печати. Он не успел написать

---

\* P. Laberthonie. *La Relation de la conversion et de la mort de M. B. Paris*, 1784. (Перепечатано также в *Le Supplément aux œuvres du P. la Berthonie*. Paris, 1811).

предисловие, оставил вместо некоторых чисел пробелы, надеясь на возможность провести летом 1759 г. дополнительные, более точные опыты и тогда вписать новые данные.

Смерть постигла Бугера во время каникул Академии; де-ла-Кайль в Париже не было. Бумаги, в том числе листы подлинника, а также приборы Бугера были проданы или растеряны. Остался дубликат рукописи, переписанный чужой рукой.

Де-ла-Кайль достойно выполнил возложенное на него Бугером дружеское поручение. „Оптический трактат о градации света“ появился в свет в 1760 г.

В 1762 г. Иоахим Рихтенбург перевел трактат Бугера на латинский язык, не исправив ни одной из многочисленных опечаток французского издания [36].

Для характеристики содержания и значения оптического трактата Бугера необходимо привести данные об истоках фотометрии.

## II. Фотометрия до Бугера

Возникновение общих представлений о направлении и количестве света не требовало предшествующего развития науки, их делала ощущимыми повседневная жизнь. Понятие о луче зрения имеет, вероятно, не меньшую давность, чем геометрическое понятие о прямой. На заре человечества следует также искать возникновения понятий „светлее“ и „темнее“ — о большем и меньшем количестве света. Однако научное развитие понятий о направлении и количестве света шло далеко не параллельно.

Представление о луче света как о направлении послужило отправной точкой для развития геометрической оптики. Изменение направления лучей при их отражении и преломлении изучалось тысячелетия назад, как об этом свидетельствуют трактаты по оптике Евклида, Птоломея — памятники оптической культуры античного мира. После трудов Галилея, Кеп-

лера, Декарта, Ферма в первой половине XVII в., Ньютона и Гюйгенса во второй его половине, геометрическая оптика уже к началу XVIII в. основывалась на подлинном научном знании и являлась хорошо разработанной, даже во многих второстепенных деталях, научной дисциплиной.

Представление о луче света как о носителе энергии, оценка его по большей или меньшей силе воздействия на глаз послужили основой для развития другой главы оптики — фотометрии.

Фотометрия как совокупность научных знаний о количестве света возникла значительно позже геометрической оптики.

Относительный уровень знаний по фотометрии к началу XVIII в. был примерно таким же, как по геометрической оптике за два тысячелетия до этого. Такое положение определялось в значительной мере общими путями развития науки. Геометрическая оптика в большей мере дитя математики, чем физики, а фотометрия, наравне с другими главами физической оптики, начала развиваться лишь тогда, когда метод научного эксперимента стал оружием исследователя.

Были различны и запросы человеческой практики к развитию геометрической оптики и фотометрии. Если углубление знаний об отражении и преломлении света было прямо необходимо для построения оптических инструментов, то в то же время техника освещения не предъявляла до конца XVIII в. никаких требований к развитию фотометрии.

Источники света в течение тысячелетий почти не совершенствовались, человечество вынуждено было удовлетворяться лучинами, факелами, масляными плошками и, впоследствии, свечами.

В начале XVII в. уже использовались телескопы и микроскопы; улицы городов в это время никак не освещались и, выходя вечером из дома, человек вооружался факелом. Ламповое стекло, обеспечивающее тягу в источниках с пламенем, было изобретено после того, как уже изготавливались ахроматы.

тические объективы для телескопов. Достаточно вспомнить, что керосиновые лампы появились лишь во второй половине XIX в., опередив не больше, чем на одно-два десятилетия рожденные русскими изобретателями электрические источники света.

Светотехника много моложе оптотехники, и в значительной мере потому и фотометрия стала развиваться значительно позже геометрической оптики.

Приведем краткий очерк истории фотометрии, стараясь при этом указывать на такие примеры, которые полезны для понимания творчества Бугера.

Фотометрия родилась в недрах астрономии. Уже Гиппарх (II век до н. э.), составляя первый звездный каталог, разделил звезды по их видимому блеску, по звездной величине. Изучение ближайших небесных тел, планет и их спутников, прежде всего Луны, требовало понимания законов их освещения и отражения ими света, то есть установления кардинальных фотометрических соотношений. Астрофотометрия и, главным образом, фотометрия планет и явились основными побудителями к накоплению первоначальных фотометрических знаний.

Вспомним, например, замечательные суждения об отражении света луною Галилео Галилея (1564—1642), оптические работы которого, как известно, заслуживают самого внимательного изучения.\* Приведем некоторые выдержки из „Диалога“.\*<sup>\*\*</sup> Обратимся непосредственно к спору между Симпличио и Сальвиати об отражении света Луною. Этот ученый спор излагается на страницах раздела „День первый“. Симпличио считает Луну „гладкой и выложенной, как зеркало“ и утверждает, что „возвышенности и углубления на Луне — иллюзии, вызван-

\* Акад. С. И. В а в и л о в. Галилей в истории оптики. Сборник „Галилео Галилей“. Изд. Академии Наук СССР, 1943.

\*\* Галилео Г а ли л е й. Диалог о двух главнейших системах мира — птоломеевой и коперниковой. Техн.-теор. изд., 1948.

ные прозрачностью и непрозрачностью". Сальвиати, устами которого говорит Галилей, доказывает, что поверхность Луны не является зеркальной, а шероховатой. Он считает, что шероховатая поверхность „образована из бесчисленного количества очень маленьких поверхностей, расположенных с бесконечным разнообразием наклонов, причем неизбежно случается так, что многие из них посыпают отражающиеся лучи в одно место, а другие — в другое; словом, нет такого места, куда не достигло бы множество лучей, отраженных от множества крохотных поверхностей, рассеянных по всей поверхности шероховатого тела, на которое падают светоносные лучи... поэтому и Луна, так как поверхность ее шероховата и негладка, отсылает свет Солнца во все стороны". Отметим здесь же, что это представление о сущности отражения света шероховатыми поверхностями было положено в дальнейшем Бугером в основу его теории.

Особого внимания заслуживает высказывание Сальвиати о распределении яркости по диску Луны (рис. 1).

„Представьте себе, что все параллельные линии, исходящие из точек  $A$  и  $B$ , являются лучами, которые до линии  $CD$  доходят под прямыми углами; наклоните теперь эту же самую линию  $CD$  так, чтобы она нагнулась, как  $DO$ : разве вы не видите, что значительная часть тех лучей, которые ранее падали на  $CD$ , проходят, не касаясь  $DO$ ? Значит, если  $DO$  освещена меньшим количеством лучей, то вполне понятно, что воспринимаемый ею свет слабее. Вернемся теперь к Луне. Раз она сферической формы, то если бы поверхность ее была так же гладка, как и у этой бумаги, то те части ее полусфера, освещенной солнцем, которые находятся около краев, получили бы гораздо меньше света, чем средние части, так как на первые лучи падают очень косо, а на вторые — под прямым углом. Поэтому в полнолуние, когда мы видим

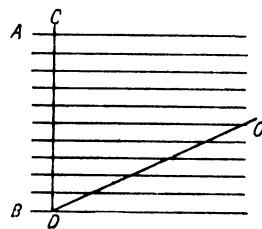


Рис. 1.

почти всю полусферу освещенной, части около середины должны были бы казаться нам более блестящими, чем другие, находящиеся около окружности, а этого не наблюдается. Вообразите себе теперь лик Луны усеянным очень высокими горами; разве вы не видите, как их склоны и скаты, возвышаясь на выпуклости совершенной сферической поверхности, оказываются обращенными к Солнцу и способными воспринимать лучи гораздо менее косо, а потому казаться освещенными так же, как и остальные?..”.

Следует отметить, что это толкование Галилея в общем соответствует и современным теориям и современным экспериментальным данным.

Интерес к вопросу об отражении света Луною возник уже в Средние века, и приведенный спор Симпличио и Сальвиати заставляет вспомнить о беседе поэта и Беатриче в „Божественной комедии“ *Данте Алигьери* (1265—1321), величайшем творении поэзии и науки средневековья. Обратимся ко второй песне „Рая“ — заключительной части „Божественной комедии“. Данте, смотря в обращенные к высоте глаза Беатриче (откровения), возносится от неба к небу. Данте вопрошают о причине светлых и темных пятен на поверхности Луны и объясняет их, так же как Симпличио в „Диалоге“, разной степенью плотности (скважности) отдельных частей Луны. Беатриче, не соглашаясь с ним, говорит:

Коль скоро эта скважность не сквозная,  
То есть предел, откуда вглубь лежит  
Ее противность, дальше не пуская.

Отсюда чуждый луч назад бежит,  
Как цвет, отосланный обратно в око  
Стеклом, когда за ним свинец укрыт.

Ты скажешь мне, что луч, войдя глубоко,  
Здесь кажется темнее, чем вокруг,  
Затем, что отразился издалека.

Чтоб этот довод рухнул также вдруг,  
Тебе бы опыт сделать не мешало,  
Ведь он для вас — источник всех наук.

Возьми три зеркала, и два сначала  
Равно отставь, а третье вдалъ попять,  
Чтобы твой взгляд оно меж них встречало.

К ним обратясь, свет за спиной приладь,  
Чтоб он все три замег, как строй светилен,  
И ото всех шел на тебя опять.

Хоть по количеству не столь обилен  
Далекий блеск, он яркостью своей  
Другим, как ты увидишь, равносилен.\*

Эти строки поэмы заслуживают, в рамках настоящей статьи, особого внимания не только потому, что в них воспевается опыт как „источник всех наук“, но и потому, что примером служит опытное доказательство независимости яркости зеркального изображения от расстояния до предмета и наблюдателя.

Данте был предвестником эпохи Возрождения, из деятелей которой, вспоминая историю фотометрии, мы должны прежде всего обратиться к предшественнику Галилея *Леонардо да Винчи* (1452—1519). Леонардо старался осознать количественные соотношения, определяющие распределение света и тени. В „Книге о живописи мастера Леонардо да Винчи, живописца и скульптора флорентинского“ мы читаем: „Здесь возразит противник, что он не хочет всей этой науки, что с него хватит практики срисованных природных вещей. На что следует ответ, что ничто нас так не обманывает, как доверие к нашему суждению без всякого иного основания, как это всегда доказывает опыт“\*\*.

\* Данте Алигьери. Божественная комедия. Рай. Перевод и примечания М. Лозинского. ОГИЗ, 1945.

\*\* Книга о живописи мастера Леонардо да Винчи, живописца и скульптора флорентинского. ОГИЗ—ИЗОГИЗ, 1934.

В „Книге о живописи“ современный читатель находит не только изумительные и сокровенные высказывания по искусству, но и много интересного об условиях природного освещения, распределении света, зрительном восприятии ландшафта и освещенных тел. Наблюдательность и прозорливость гениального художника и ученого позволили Леонардо да Винчи формулировать много таких положений, которые и поныне вызывают живой интерес не только художника, но и физика.

Тщательно разработанная Леонардо геометрическая наука о тенях и полутенях приводит его к суждениям о количестве света и его распределении. Однако основные законы фотометрии им не формулируются. Леонардо отмечает в общем виде, что степень освещения убывает по мере увеличения наклона падающего пучка. Нельзя признать точным и его утверждение, что „между самой близкой и самой удаленной частями будет то же отношение в степени их освещенности, что и в степени их удаленности от тела, их освещавшего“.

Здесь уместно привести следующие слова академика С. И. Вавилова:

„Следует вообще подчеркнуть особенность научного гения Леонардо. Он был изумительным наблюдателем по точности, вниманию и умению заметить существенное, мастером количественного эксперимента, но лишен дара абстракции, необходимой теоретику. Абстракция заменялась конкретным художественным восприятием; вместо обобщений и отвлеченности у Леонардо господствует аналогия и метафора. Поэтому наиболее ценное в его научном наследстве — это наблюдения и опыт. Его заметки по атмосферной и физиологической оптике до сих пор представляют немалый непосредственный, а не только исторический интерес. С другой стороны, Леонардо — бесспорный зачинатель фотометрии как точной измерительной науки. Его рисунки и пояснения к ним... не оставляют никакого сомнения в том, что Леонардо экспе-

риментировал с фотометрической установкой типа Румфорда\*:

В манускриптах Леонардо имеется ряд набросков и записей, относящихся к сопоставлению источников света. Он брал свечи одинаковой или разной силы света и устанавливал между ними дощечку, отбрасывавшую их тени. Приведем в вольном переводе некоторые примеры записей Леонардо:

„Если установить на равном расстоянии между двумя свечами темное тело, то оно отбросит две противоположные тени, отличающиеся в той же мере по темноте друг от друга, в какой отличны создающие их источники света“. Если источники света одинаковы, то „тени по степени темноты находятся в том же отношении, в каком находятся удаления источников света“. „Однако, если большая свеча удалена от затемняющего тела, а малая свеча стоит близко от него, то, без сомнения, тени могут быть равной темноты или ясности“.

В числе предвестников точного фотометрического знания следует назвать примечательного оптика XVI в., итальянского ученого, грека по происхождению *Франческо Мавролико* (1494—1575). Имеется несколько изданий его трактата с причудливым названием „Свет о свете“ („Photismi de Lumine“), впервые опубликованного в 1575 г.\*\* Это строгий труд ученого, написанный в соответствии с установившимися еще со времени Евклида формами изложения математических дисциплин. Каждая глава начинается определениями, за которыми следуют постулаты. Содержание строится как последовательность теорем. Каждая теорема вначале формулируется, затем доказывается и, если это необходимо, снабжается следствиями и толкованиями.

Мавролико указывает, что световые лучи образуют пирамиду, вершина которой лежит в рассматриваемой точке света.

\* Акад. С. И. Вавилов. Галилей в истории оптики. Сборник „Галилео Галилей“. Изд. Академии Наук СССР, 1943.

\*\* Английский перевод: „The Photismi de Lumine of Maurolycus. A Chapter in Late Medieval Optics“. New York, 1940.

тящего тела и которая имеет основанием освещаемое тело. Мавролико постулирует также, что интенсивность освещения определяется плотностью лучей. Однако он не приходит еще из этих двух положений к выводу о том, что освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния. Правильные положения чередуются у него с ошибками. Приведем в качестве иллюстрации формулировку одной из фотометрических теорем Мавролико:

„Теорема VII Точечный источник света, помещенный либо в центре, либо в любой точке окружности круга, будет освещать различные части этой окружности с равной интенсивностью“.

В трактате Мавролико мы находим зачатки науки о фотометрическом расчете, через двести лет после него глубоко развитой и тщательно разработанной Ламбертом.

Существенное фотометрическое соотношение было сформулировано в 1604 г. Иоганном Кеплером (1571—1630). В первой главе сочинения „Ad Vitellonem Paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur“ мы находим следующее утверждение: „Силы света расходящихся лучей убывают в обратных отношениях к воспринимающим плоскостям“.

Подробные суждения о свете и тени, могущие быть отнесенными к фотометрической науке, содержатся в изданном в 1613 г. в Антверпене и иллюстрированном Рубенсом трактате об оптике Франсуа д'Эгийона или, иначе говоря, *Францискуса Агвилониуса* (1566—1617).\* Агвилониус родился в Брюсселе, скончался в Антверпене, где был профессором. Повидимому, Агвилониус был человеком большой учености, но не был крупным мастером науки; его трактат еще ждет своего исследователя. Книга Агвилониуса особо привлекает к себе внимание тем, что шесть заставок к отдельным главам трактата представляют посвященные опти-

---

\* Francisci Agvilonii. Opticorum Libri Sex. Antverpiae, 1613.

ческим сюжетам изумительные гравюры резцом на меди. Они принадлежат, как это теперь с несомненностью установлено, великому фламандскому живописцу и граверу Питеру-Павлу Рубенсу (1577—1640).\* Рисунки Рубенса отлично воспроизведены гравером Галле.

Мы приводим ниже фотографию с заставки к книге пятой „De luminoso et opaco“. Это первое из известных изображений фотометрической установки в подлинном смысле этого слова (не считая набросков Леонардо да Винчи). На гравюре изображен ученый, проводящий фотометрический опыт с двумя „ассистентами“—амурами. Они добиваются равенства освещеностей от двух разноудаленных светильников, более слабого с одним огнем и более сильного с двумя. Здесь изображены все существенные детали фотометрической установки. Один амур поддерживает экран, другой удаляет более сильный источник и тем достигает равенства яркостей обоих „фотометрических полей“. Рисунок достоин мастера, и Рубенса если и можно упрекнуть, наряду с Франциском Агвилонским, то лишь в том, что световое равновесие достигается тогда, когда два огня удалены на вдвое большее расстояние, чем один.

Некоторые суждения фотометрического характера были высказаны Ренэ Декартом (1596—1650).

Экспериментальные методы сравнения количеств света до появления работ Бугера весьма несовершены. Остановимся, например, на фотометрии великого Христиана Гюйгенса (1629—1695). Обратимся к его трактату „Космотеорос“, посвященному вопросам строения вселенной и, в частности, солнечной системы; в нем излагается идея множественности обитаемых миров. Эта книга вышла в 1698 г., в год рождения Бугера. Отметим, что она имела в свое время существен-

\* Е. Г. Лисенков. Иллюстрации Рубенса к книге Агвилониуса об оптике. Труды Госуд. Эрмитажа по истории западноевропейского искусства, том III, 1949.

ное значение для установления в России гелиоцентрического мировоззрения. Она была переведена на русский язык по прямому указанию и под непосредственным наблюдением Петра Первого.\*

В „Космотеоросе“ описывается следующий астрофотометрический опыт. Желая узнать, во сколько раз свет от звезды Сириус слабее света Солнца, Гюйгенс наблюдает Солнце через трубу, закрытую экраном с весьма малым отверстием, и сопоставляет по зрительному воспоминанию свет от малого участка Солнца со светом Сириуса ночью.\*\*

Способ Гюйгенса был подвергнут Бугером справедливой критике еще в первой его книге „Опыт о градации света“[4], где он пишет:

„Г. Гюйгенс сильно ослаблял свет Солнца в желаемом отношении, наблюдая это светило через крайне малое отверстие, от которого он удалял в большей или меньшей мере свой глаз; но как можно после этого увериться, что этот свет был уравнен свету Сириуса, который появляется только ночью, и я не знаю, через сколько часов позже? То же самое будет происходить всегда: никогда не вспомнишь достаточно хорошо силу одного из светов, если ныне воспринимаешь другой, если только не располагать третьим, который можно использовать при одном и другом наблюдении.“.

Еще более обстоятельные доводы против фотометрии Гюйгенса приводит Бугер в „Оптическом трактате“[36], где он, в частности, отмечает различие в состоянии адаптации глаза при обоих наблюдениях.\*\*\* Справедливость требует отметить, что сам Бугер способов звездной фотометрии не предлагал.

\* „Книга мирозрения или мнение о небесноземных глобусах и их украшениях Христиана Гюенса. Напечатана в Санкт-Петербургской типографии 1717 году, а в Московской 1724 году“.

\*\* Подробное описание опыта Гюйгенса дано в Комментарии (приложение 29) в связи с критическими замечаниями Бугера.

\*\*\* Книга первая, раздел первый, глава IX.

Уже после опубликования в 1729 г. „Оыта о градации света“ Бугера, а именно в 1735 г., Цельзий (1701—1744), знаменитый шведский астроном, автор носящей его имя температурной шкалы, предложил другой способ измерения света, также раскритикованный Бугером как в той же главе трактата [36], так и несколько раньше в докладе „О способах измерения света с некоторыми применениями этих способов“ [34], где он пишет:

„Некоторые ученые, вместо того чтобы наблюдать количество света или его интенсивность, полагали, что следует выбирать в качестве критерия большую или меньшую степень различия, с которой мы видим. В числе других г-н Цельзиус, знаменитый шведский астроном, который сопровождал наших академиков в путешествии к Полярному кругу, предложил этот второй способ вниманию Академии в 1735 г. Он выбирал маленький предмет, например некоторые рукописные шрифты, и, поднося их по очереди к двум светящимся телам, удалялся больше или меньше до тех пор, пока не усматривал их равно отчетливыми, и утверждал, что для получения отношения интенсивностей двух источников света достаточно взять восьмые степени обоих расстояний (... упоминается лишь о четвертой степени, но это говоря о различных расстояниях от предмета до глаза и светящего тела, а отсюда должна следовать, согласно этому астроному, восьмая степень первых из этих расстояний для отношения сил самих светов). Предположим, что оказалось нужным поместить предмет в две раза ближе к глазу, когда он был освещен свечой, чем когда светильником; стало быть, утверждается, что первое из этих двух светящихся тел посыпает в двести пятьдесят шесть раз больше лучей, чем второе, так как 256 есть восьмая степень 2. Я не буду оспаривать, что это отношение иногда случайно имеет место, при некоторых расстояниях и для глаз вполне определенного строения. Действительно, все мы нуждаемся, чтобы хорошо видеть, в некотором количестве света, и это количество различно в зависимости от

большей или меньшей чувствительности сетчатки и большей или меньшей легкости, с которой наш зрачок расширяется и сужается. Также верно, что, приближаясь к предмету, мы получаем больше лучей и частично восполняем недостающий свет. Однако, если расположиться слишком близко или далеко, лучи, которые проникают через хрусталик, пересекутся до того, как достигнут дна глаза или, наоборот, пересекутся за ним; каждая точка предмета не будет, следовательно, изображена резкой точкой на сетчатке, изображение будет смутным, и отнюдь не существует интенсивности света, который мог бы возместить этот недостаток, поскольку он совершенно иного рода, чем порождаемый большим или меньшим количеством лучей. Г-н Цельзиус уверяет, что он нашел этим методом, что свет от солнца в триста тысяч раз сильнее, чем свет от полной луны при средних ее удалениях. Это полностью совпадает с тем, что было открыто мною; однако необходимо мне изъяснить, без вреда уважению памяти этого искусного астронома, что его одобрение, которое было бы столь высоко авторитетно во всяком другом случае, никак не обосновывает мое прежнее определение. Другой наблюдатель, глаза которого были бы иного строения, чем у шведского ученого, но который придерживался бы тех же принципов, пришел бы к совершенно иному закону, пользуясь иными расстояниями: вместо того, чтобы найти отношение восьмых степеней, он нашел бы отношение седьмых или шестых. Каким образом, однако, он знал бы, что это мнимое правило выполняется при сравнении светов, находящихся в совершенно иных отношениях, нежели те, на которых оно основано, или для которых оно проверено непосредственным опытом? Г-н Цельзиус проводил, повидимому, слишком грубые линии или довольствовался весьма неотчетливым видением, что воспрепятствовало ему заметить весьма существенные различия. Помимо того, полагая за верное стоявшее под вопросом, он опрокинул естественный порядок такого рода исследований. Действительно, труднее подчинить опре-

деленному закону степень различия, с которой мы видим предметы, чем непосредственно измерять свет”.

После этой, пожалуй, чрезмерно суровой критики способа Цельзия Бугер в своей статье показывает, что предлагаемый им метод измерения количества света не имеет тех недостатков, которые свойственны приему, использованному Цельзием.

Способ, аналогичный способу Цельзия, использовал, в качестве вспомогательного, также и Бюффон в 1747 г. при измерении коэффициента отражения зеркал. Сидя перед зеркалом с книгой, он просил приближать свечу до тех пор, пока он мог четко различать буквы в книге, после чего свечу еще приближали до тех пор, пока становились вполне отчетливо различимыми буквы книги в ее отражении от зеркала. Первое расстояние оказалось равным 24 футам, второе — 15, из чего Бюффон заключил, что прямой свет относится к отраженному, как 576 к 225.

Весьма любопытный метод измерения света был предложен в 1700 г. *Франсуа Мари*.<sup>\*</sup> Его брошюра, сокращенный перевод которой, благодаря библиографическим изысканиям акад. С. И. Вавилова, удалось дать в виде приложения в настоящей книге, представляет интерес для истории оптики как первое из известных сочинений, специально посвященных измерению света. Способ Мари, наравне со способом Гюйгенса и Цельзия, был подвергнут критике Бугером в его трактате.

Ф. Мари является создателем фотометрического метода гашения, заключающегося в ослаблении измеряемого света в известное число раз до гашения, то есть до достижения порога зрительного восприятия, и в суждении о количестве света по тому, во сколько раз потребовалось его ослабить. Ф. Мари строил на этом принципе фотометрические приборы, которые он называл люциметрами.

\* François Marie. Nouvelle découverte sur la lumière, pour la mesurer et compter les degrés. Paris, 1700, in 8°.

Бугер правильно порицает Мари за то, как он оценивал суммарное ослабление света при многоократных последовательных его ослаблениях. Мари считал, что свет ослабляется в арифметической прогрессии, а не в геометрической, как это впоследствии было установлено Бугером. Мари, ослабляя свет поглощающими стеклами или толщей воды или повторным отражением от полированных поверхностей, ошибался в расчете, принимая, что ослабление света прямо пропорционально числу введенных поглощающих или отражающих пластин или пронизанной светом толще жидкости, которая его поглощает.

По поводу критики самого метода измерения, предложенного Мари, то есть метода гашения, можно сказать следующее. Бугер совершенно правильно полагал, что этот метод не мог служить той основой, на которой следовало строить науку о фотометрических измерениях. Метод Мари, как показало почти через двести пятьдесят лет дальнейшее развитие науки, оказался в руках искусственных экспериментаторов отличным приемом для решения специальной задачи измерения предельно малых количеств света. Методом гашения широко пользовался акад. С. И. Вавилов и его ученики в их работах по зрительному установлению квантовой природы света и исследованию явлений люминесценции и новых видов излучения. Прием гашения света до порога восприятия был использован для выявления того замечательного обстоятельства, что чувствительность световоспринимающего аппарата глаза близка к предельно мыслимой; несколько доходящих до сетчатой оболочки квантов света достаточно для создания зрительного восприятия светового проблеска.\*

Опыты Гюйгенса и Мари по измерению света лишь на несколько десятилетий предшествовали первым фотометри-

---

\* С. И. Вавилов. Экспериментальные исследования световых квантовых флюктуаций визуальным методом. Успехи физических наук, т. 36. вып. 3, 1948.

ческим работам Бугера. Работа Цельзия была опубликована после них. Это свидетельствует о том, что до Бугера фотометрии как науки не было.

Чтобы охарактеризовать с точки зрения истории оптики эпоху деятельности Бугера, можно сказать, что в год кончины Ньютона (1727) Бугеру было двадцать девять лет, Леонарду Эйлеру двадцать, Ломоносову шестнадцать, а Ламберт еще не родился. Интересно и даже, пожалуй, не совсем понятно, что вопросы фотометрии никак не затрагивались Ньютоном. О фотометрии Эйлера и Ламбера речь будет идти ниже, в связи с работами Бугера.

Заслуживает особого упоминания, что вопросы фотометрии в некоторой мере интересовали и величайшего гения М. В. Ломоносова (1711—1765). В „Росписи сочинениям и другим трудам советника Ломоносова“ в числе прочих новых изобретений в области физических наук упоминается „светомерная труба для исследования расстояния и величины неподвижных звезд“. На этот прибор и на то, что Ломоносов был первым русским фотометристом, обратил должное внимание акад. С. И. Вавилов.\*\* Описания и чертежей *Tubus Photometricus ad comparandum lumen astrorum constructus a ML*, т. е. фотометрической трубы для сравнения света звезд, построенной Ломоносовым, не сохранилось. В лабораторном дневнике Ломоносова за 1762—1763 г. „Химические и оптические записки“ содержится следующая запись:

„... рассуждая свет ночной от одних звезд, заключить должно, что их диаметр не так мал, как думают. И так в камеру выбеленную впускать свет солнечный сквозь разные дырки на бумагу, чтоб от ней во всю камеру свет распространялся, и мерить свет, читая такую печатную книгу, кою

\* Научное наследство, том I. Изд. Академии Наук СССР, 1948.

\*\* С. И. Вавилов. Оптические работы и воззрения М. В. Ломоносова. Природа, 1936, № 12.

можно при одном сиянии звезд читать зимою. Апертуру разделить на число звезд видимых, число покажет диаметр звезд".

"В. Вместо бумаги взять раздробленную мелко ртуть, поставить середи покоя, рефлексию лучей сделать на ртуть с другой стороны, чтобы повсюду свет рассыпался. Вместо литер употребить пункты или черты разной величины на бумаге, для того сделать раздвижную трубку. Высинить внутри так бело, чтоб с ясным небом издали не распознать".\*

Как видно из этой записи, идея Ломоносова заключалась в том, чтобы оценивать свет звезд путем сопоставления со светом Солнца, прошедшем через малое отверстие, и световое равенство устанавливать не по памяти, как это делал Гюйгенс, а по критерию одинакового различия деталей.

### III. Фотометрия Бугера

Оптический трактат, изданный в 1760 г., охватывает все то, что сделано Бугером в области фотометрии, начиная с первого исследования по этому вопросу в 1725 г. Поэтому обзор его содержания может дать полную характеристику фотометрии Бугера.

Трактат состоит из трех книг:

Книга первая. „Различные способы измерения света и некоторые приложения этих способов“.

Книга вторая. „Исследования количества света, которое отражается поверхностями, как гладкими, так и шероховатыми“.

Книга третья. „Изыскания о прозрачности и непрозрачности тел“.

*Первая книга* трактата посвящена обоснованию фотометрических понятий и метода визуальной фотометрии, описанию приемов измерения, инструментов, а также результатов проведенных фотометрических опытов.

---

\* М. В. Ломоносов, Сочинения, том VII. Изд. Академии Наук СССР, 1934.

Бугер устанавливает общие и частные понятия о количестве света и четко формулирует основной принцип визуальной фотометрии (принцип градации света), заключающийся в том, что сравнение двух количеств света проводится изменением одного из них в известное число раз до достижения светового равновесия для глаза с другим. В том случае, если сравниваемые количества света не могут быть сопоставлены непосредственно (как, например, свет солнца и луны), берется в качестве общей меры третий, вспомогательный, достаточно постоянный источник, со светом которого поочередно уравниваются сравниваемые количества света.

Изменение количества света в известное число раз достигается Бугером разными путями. В качестве исходного служит изменение числа расположенных рядом одинаковых источников света. Основным способом является изменение расстояния от источника света, при котором количество перехватываемого от удаленного источника света убывает, как квадрат расстояния до него. Весьма умело Бугером используются также для светового уравнивания линзы. При сравнении сильно различающихся по силе света источников Бугер получает при помощи положительных линз промежуточные изображения этих источников (фиг. 2 трактата) и из сопоставления силы света этих изображений вычисляет отношение сил света самих источников. Отрицательные линзы служат для расширения пучка и уменьшения создаваемый им освещенности в известное число раз (как, например, при измерении освещенности от солнца). Для уравнивания света Бугер использует также способ изменения светящей площади, например отверстия в камере-обскуре, через которое поступает свет от неба.

Бугер вводит в обиход науки основной способ визуального фотометрирования, заключающийся в одновременном наблюдении двух соприкасающихся полей, одно из которых освещается светом от одного, а второе от другого из сравниваемых источников. Гравюра Рубенса с изображением ученого и амуроу фоторетрической установки в книге об оптике Францискуса

Агвилониуса, о которой речь шла выше, отодвигает истоки принципа и способа светового уравнивания в предшествующее жизни Бугера столетие. Бугер подвергает справедливой и убедительной критике иные способы суждения о количестве света, предложенные его предшественниками и современниками — Гюйгенсом, Мари, Цельзием.

Бугер устанавливает линейность обычных фотометрических соотношений, сказывающуюся, например, в том, что отраженные или пропущенные телом потоки света пропорциональны падающему потоку. Он показывает, что зрительное восприятие различия в яркостях двух соприкасающихся полей определяется не разностью абсолютных значений, а отношением яркостей. Бугер усматривает величайшее психофизическое значение в этом факте, поскольку именно отношение яркостей остается неизменным при изменении уровня освещения. Бугер устанавливает, что яркостный контраст, когда он меньше определенного значения, которое Бугер оценивает около 1,5%, не выявляется глазом. Бугер пишет:

„Вообще, чувства нам даны не для того, чтобы в точности показывать, насколько различные причины наших ощущений сильнее друг друга; они премудро приготовлены к тому, чтобы просто отмечать различия тех отношений, в которых эти причины с нами находятся. Сами причины могут отличаться весьма сильно, но если это различие едва ощутимо, оно еще не представляет для нас интереса, оно нам ничем не угрожает. В равной степени возможно, что чрезвычайно малое различие отвечает весьма различным ощущениям, ибо это небольшое увеличение воздействия бывает иногда в состоянии вызвать изменение наших конституционных свойств; а потому существенно, для нашего самосохранения, чтобы мы были об этом во-время предупреждены“.

Мысли о биологическом значении закона Вебера — Фехнера, который, пожалуй, можно было бы с неменьшим правом называть психофизиологическим законом Бугера, весьма поучительны.

Установление критерия контрастной чувствительности глаза позволяет Бугеру, в качестве примера, высказать совершенно правильное положение о том, что погруженный в воду объект перестает быть различимым на той глубине, когда отношение яркости доходящего от него света к яркости света, отражаемого поверхностью воды и рассеиваемого ее толщиной, становится соответствующим порогу контрастной чувствительности. Количественную теорию этого вопроса Бугер дает в третьей книге трактата.

Бугер обстоятельно поясняет различие в понятиях об общем количестве света, испускаемом источником, и о его яркости как количестве света, исходящем с единицы площади. Бугер показывает, что зрительное восприятие определяется распределением освещенности по сетчатой оболочке глаза, что яркость не зависит от расстояния наблюдения, поскольку при изменении расстояния до протяженного светящего тела освещенность его изображения на дне глаза остается неизменной. Попутно Бугер выводит основные соотношения фотометрии оптического изображения.

Бугер подробно описывает ряд остроумных и глубоко продуманных лабораторных фотометрических установок для сравнения сил света источников, измерения коэффициентов пропускания прозрачных тел, коэффициентов отражения зеркал. Для сравнения яростей в двух направлениях Бугер строит полевые переносные приборы, люциметры, являющиеся относительными фотометрами. Предложенные Бугером схемы и поныне представляют интерес для фотометрического приборостроения.

Второй раздел первой книги Бугер посвящает применению разработанных им способов измерения света к решению ряда задач оптики. Он определяет коэффициенты отражения света от металлических и стеклянных зеркал, измеряет пропускание света стопкой стеклянных пластин, измеряет в лабораторных условиях прозрачность морской воды.

Совершенно правильно истолковывая свет неба как рассеянный атмосферой свет солнца, Бугер изучает яркость неба

или, иначе говоря, атмосферы в различных направлениях. Он сопоставляет освещенность от прямых лучей солнца с освещенностью от неба и между собою свет от различных квадрантов неба. К сожалению, числовые результаты этих измерений в трактате не проставлены.

Пожалуй наибольший интерес представляют произведенные Бугером фотометрические измерения небесных светил; этим измерениям посвящены последние главы первой книги трактата.

Бугер измеряет освещенность от полной луны при двух различных ее возвышениях над горизонтом, что позволяет ему оценить прозрачность атмосферы. Бугер измеряет освещенность от солнца и луны при одном и том же их возвышении над горизонтом. Источником света сравнения при этих, равно как и других, наблюдениях служат свечи — сальные и восковые.

Первая работа Бугера, изданная в 1726 г., выходит под наименованием „Сравнение силы света от Солнца, Луны и многих свечей“[1].

Результаты выполненных измерений были опубликованы Бугером также в „*L'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière*“ и были использованы Леонардом Эйлером для расчета яркости солнца в его мемуаре „*Рассуждения о различных степенях света Солнца и других небесных тел*“.\* Бугер показал, что если пучок солнечных лучей при возвышении Солнца  $31^{\circ}$  расширить отрицательной линзой в 108 раз, то есть уменьшить освещенность в  $108^2 = 11\,664$  раз, то она уравновешивается освещенностью, создаваемой свечой на расстоянии 16 дюймов. Эйлер использует эти данные для сопоставления яркости солнца и яркости свечи. Приведем ход его расчета. Радиус солнца при средних до него расстояниях виден под углом

---

\* Euler. *Réflexions sur les divers degrés de lumière du Soleil et des autres corps célestes. Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles Lettres, Année MDCCL.* Berlin, 1752.

$16'7''=967''$ . Свечу Эйлер мысленно заменяет шаром радиусом  $\frac{1}{4}$  дюйма, которой с расстояния в 16 дюймов виден под углом  $51'=3060''$ . Отсюда следует, что отношение видимой яркости солнца к яркости свечи равно

$$11\,664 \left( \frac{3060}{967} \right)^2 = 116\,860,$$

а поскольку лучи солнца прошли через атмосферу, потеряв при этом, по измерениям Бугера, одну треть света, то можно считать, что солнце в 175 000 раз ярче свечи. Упоминая еще о возможных потерях света в эфире, Эйлер говорит, что солнце в тысячи раз ярче самых ярких земных источников (расплавленных металлов). Этот замечательный расчет Эйлера был совершенно забыт.

Особый интерес представляет последняя глава первой книги, содержание которой ясно из ее наименования: „Наблюдения, сделанные с целью определить, насколько сильнее светят части солнца, близкие к его середине, сравнительно с теми, которые расположены у краев этого светила“.

Бугер проводит сравнительные измерения яркости солнечного диска в центре ближе к его краю и убеждается в падении яркости к периферии. Разные участки поверхности солнца светят к земному наблюдателю под разными углами: центральные — по нормали, крайние — скользящими лучами. Изменение распределения яркости по диску солнца позволяет поэтому, как показывает Бугер, непосредственно судить об изменении яркости с направлением излучения.

Результат своих измерений Бугер толкует следующим образом. Если бы сила света элемента поверхности излучающей сферы была по всем направлениям одинакова, то яркость возрастала бы обратно пропорционально косинусу угла, образуемого лучом с нормалью. При наблюдении излучающей сферы яркость должна была бы возрастать от центра к периферии, достигая на краю видимого диска бесконечно большого значения. Так как это явно не так, то данное предпо-

ложение следует сразу отбросить. Если бы сила света излучающего элемента изменялась пропорционально косинусу угла излучения, то яркость испускаемых по различным направлениям лучей была бы одинакова. Равномерно светящая сфера, испускающая свет по такому закону, казалась бы глазу диском одинаковой яркости. Это предположение ближе к истине, но и оно является лишь грубо приближенным, поскольку инструментальные наблюдения несомненно свидетельствуют о том, что в действительности яркость солнечного диска в центре больше, чем на краю. Следовательно, данные об изменении яркости с направлением излучения следует находить экспериментальным путем, а не устанавливать их умозрительно. Таков ход рассуждений Бугера.

Интересно противопоставить им те ошибочные воззрения, которых придерживались в данной области другие крупнейшие ученые — как современники Бугера, так и жившие после него.

Обратимся, например, к цитированному выше мемуару Леонарда Эйлера о степенях света солнца и других небесных светил. Исходным положением Эйлера, делающим результаты его основных, весьма интересных расчетов порочными, является постулат о независимости силы света элемента поверхности светящего тела от направления излучения. У Эйлера светит не тело, а совокупность светящих точек на его поверхности, сила света которой также не зависит от направления свечения, как масса не зависит от направления притяжения. Рассматривая в качестве источников светового действия геометрические точки на геометрической поверхности, Эйлер не мог притти к иному выводу. Здесь вспоминаются слова акад. С. И. Вавилова из его статьи о физической оптике Леонарда Эйлера: „Математическому гению Эйлера нехватало физической интуиции Ньютона и Гюйгенса“.\*

---

\* Леонард Эйлер. Сборник к 150-летию со дня смерти. Изд. Академии Наук СССР, 1935.

Рядом с последними двумя именами вполне могло бы стоять и имя Бугера.

Исходя из своего постулата, Эйлер считает, что освещение определяется суммарной поверхностью видимых излучающих участков, независимо от их наклона. Поэтому Эйлер утверждает, что горы на луне, поскольку они увеличивают поверхность этого тела, также увеличивают интенсивность его свечения. Эйлер считает, что солнце светит не так, как равносветлый диск, видимый под тем же углом, а как плоский диск, равный по площади обращенной к нам полусфере солнца.

В 1760 г., через десять лет после статьи Эйлера и в год выхода оптического трактата Бугера, появляется знаменитое сочинение по фотометрии Ламберта. В этой книге, в убедительной и исключительно тактичной по отношению к уже знаменитому и на двадцать лет старшему Эйлеру форме, Ламберт опровергает его закон излучения. Ламберт, так же как и Бугер, в частности, отмечает, что из исходного постулата Эйлера вытекает, что самосветящий шар должен иметь возрастающую от центра к краям и у самого края даже бесконечную видимую яркость. Однако Ламберт сразу же впадает в ошибку сам, устанавливая как общий и строгий закон природы пропорциональность силы света косинусу угла излучения, или, иначе говоря, постоянство яркости по всем направлениям. Ламберт основывается на том, что „ведь никто не отважится сомневаться, что... вся поверхность солнца воспринимается равносветлой“. Ламберт, используя представления теории излучения Ньютона, приводит и общее доказательство справедливости своего закона, казавшееся для своего времени убедительным. Так утверждается надолго „закон Ламбера“, который, как теперь известно, справедлив лишь для абсолютно черного тела.

Если обратиться к высказываниям по вопросу о распределении яркости по диску солнца таких крупных ученых, как Лаплас и Гершель, живших на столетие позже Бугера, то остается лишь выразить изумление творческому дару Бугера.

*Вторая книга* трактата содержит „Исследования количества света, которое отражается поверхностями как гладкими, так и шероховатыми“. Первый и второй разделы посвящены фотометрическому изучению зеркального отражения света, а третий и четвертый разделы — теории отражения света шероховатыми поверхностями и применению этой теории к вопросам фотометрии планет.

В первом разделе рассматривается вопрос о том, как рассчитывать освещенность, созданную светом, падающим от источника света на непосредственно, а после отражения от идеальной зеркальной поверхности, или, как говорит Бугер, бесконечно гладкой поверхности, не гасящей ни одного луча. В предисловии к этому разделу Бугер пишет:

„Хотя речь будет идти о вещах чрезвычайно простых, мы считаем совершенно необходимым обратить на них внимание, ибо это устранил те, сами по себе незначительные, трудности, перед которыми, однако, остановились величайшие физики и математики, трактовавшие об оптике“.

Предмет изложения, однако, не столь прост, поскольку после отражения от искривленной зеркальной поверхности пучок света от точечного источника становится астигматическим. Для современного читателя трудность изучения этого раздела трактата усугубляется незнанием второстепенных деталей геометрической теории каустик, а эти вопросы хорошо были известны во времена Бугера. В современной теоретической оптике вопросы фотометрии астигматического пучка в значительной мере забыты.

В начале Бугер рассматривает отражение света от плоского зеркала и показывает, что освещенность, созданная отраженным пучком, обратно пропорциональна квадрату расстояния от изображения.

Далее Бугер переходит к рассмотрению отражения света искривленным зеркалом и на примере сферической зеркальной поверхности показывает, что падающий на элемент поверхности зеркала пучок лучей, исходящих от свечущей точки, после

отражения перестает быть гомоцентрическим. Бугер особо отмечает трудность понимания механизма фиксации глазом астигматического изображения, иллюстрируя это случаем наблюдения предметов, погруженных под воду. Он приводит формулы, определяющие положение сагиттального и меридионального изображений от сферического зеркала; вывода он не дает, считая его читателю известным.

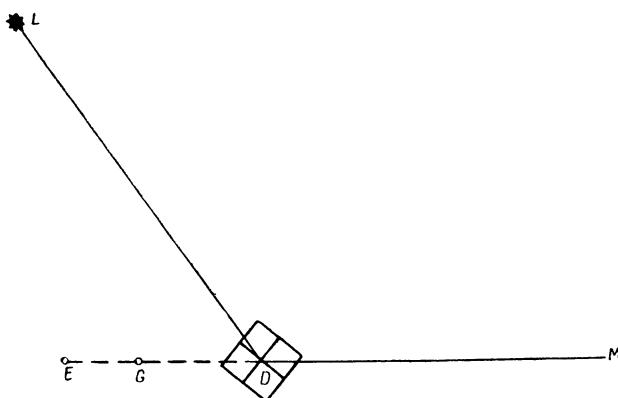


Рис. 2.

Бугер устанавливает, что если в гомоцентрическом пучке освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния от вершины пучка, то в астигматическом пучке она обратно пропорциональна произведению расстояний от меридионального и сагиттального фокусов. Это значительное и нужное положение мало популярно в современной фотометрии.

Сущность расчетов Бугера могла бы быть пересказана так. Свет от точечного источника  $L$  падает на точку  $D$  зеркала и отражается к точке  $M$  (см. рис. 2). Требуется рассчитать, какова будет освещенность в точке  $M$ , создаваемая перпендикулярно падающими лучами.

Пусть изображение точки  $L$  в меридиональных лучах есть  $E$ , а в сагиттальных  $G$ . Тогда освещенность отраженным светом в точке  $M$  равна:

$$\mathcal{E}' = \frac{I'}{ME \cdot MG},$$

где  $I'$  — сила света изображения, определяемая из соотношения:

$$\frac{I}{LD^2} = \frac{I'}{DE \cdot DG},$$

где  $I$  — сила света источника  $L$ .

Отсюда освещенность в точке  $M$ , создаваемая перпендикулярно падающими, отраженными от зеркала лучами, равна:

$$\mathcal{E}' = \frac{I}{LD^2} \frac{DE \cdot DG}{ME \cdot MG}.$$

Эту весьма полезную и общую формулу и получает Бугер.

Далее Бугер рассматривает вопрос о том, как светит зеркальная сфера, на которую падает свет от удаленного источника. Он устанавливает следующее соотношение. Сила света зеркальной сферы, полностью отражающей падающий на нее параллельный пучок света, по всем направлениям одинакова и равна

$$\frac{Er^2}{4},$$

где  $E$  — освещенность перпендикулярно падающими лучами в том пучке, который освещает сферу, а  $r$  — радиус этой сферы.

Далее Бугер подсчитывает силу света плоского диска и сферы, поверхность которых покрыта множеством маленьких зеркальных полусфер.

Соотношения, полученные Бугером в первом разделе второй книги, используются им в третьем и четвертом разделах той же книги, где изучается отражение света от матовых поверхностей.

Первый раздел второй книги завершается рассмотрением вопроса о том, как отражали бы нам свет планеты и Луна, если бы их можно было мыслить либо гладкими зеркальными

сферами, либо сферами, покрытыми множеством зеркальных полусфер. Первое предположение Бугер сразу отбрасывает, поскольку выводы из него противоречат наблюдениям. Второе предположение заслуживает, по мнению Бугера, рассмотрения и уточнения, поскольку модель такого типа соответствует наблюдаемым фактам, к числу которых Бугер относит отсутствие у планет, в отличие от Солнца, падения яркости от центра к краю диска. Бугер даже считает, что края планет и спутников более ярки, чем середина. Интересно попутное указание Бугера на его измерения яркости в разных точках Луны.

Второй раздел второй книги посвящен изысканиям о количестве света, отражаемого телами с полированными поверхностями. Бугер устанавливает, что при отражении часть света всегда оказывается как бы погашенной, поскольку лучи света всегда частично проникают внутрь тела, о чём можно судить по тому, что тело нагревается. „Было бы трудно понять, каким образом оно может приобрести эту теплоту, если только не считать, что некоторое число лучей отдаст ему часть своей силы... сообщая молекулам, из которых оно образовано, особого рода возбуждение“.

Дальше Бугер вводит понятие о коэффициенте отражения. Он измеряет коэффициенты отражения света от поверхностей ртути, воды, стекла при различных углах падения. Бугер предлагает эмпирические формулы для зависимости коэффициента отражения от угла падения для случаев отражения света от поверхности воды и поверхности стекла. Прямые результаты измерений Бугера и значения, вычисленные по построенным на их основании эмпирическим формулам Бугера, соответствуют современным данным, в частности закономерности Френеля, если не считать ошибочного мнения Бугера о том, что при предельно скользящем падении света из воздуха или при падении изнутри под углом, большим угла полного внутреннего отражения, свет все же не полностью отражается. Другими заблуждениями Бугера, к которым его привела малая точность измерений, являются

предположения о том, что на поверхностях раздела часть света гасится и что при изменении направления луча на обратное коэффициент отражения изменяется.

Третий и четвертый разделы второй книги посвящены отражению света матовыми поверхностями. Бугер указывает, что превеликое число окружающих нас тел имеет шероховатые, не гладкие поверхности, отличающиеся от обработанных полированных поверхностей твердых тел или поверхностей жидкостей тем, что они отражают свет по всем направлениям. Бугер изучает для ряда отражающих поверхностей пространственное распределение яркости (индикаторы яркости) и тем самым открывает ту главу фотометрии, которую теперь иногда называют гониофотометрией. Он строит первую теорию рассматриваемого явления, не потерявшую полностью своего значения и поныне, и применяет ее к решению астрофотометрических задач.

Перед тем как перейти к изложению сущности предпосылок и выводов Бугера, хочется дать общую оценку значения поднятого им вопроса об отражении света матовыми поверхностями. Если Бугера к изучению соответствующих закономерностей направляли лишь любознательность естествоиспытателя и желание разумно толковать вопросы об отражении света планетами и их спутниками, то за последние десятилетия поднятый Бугером вопрос стал непосредственно нужным для повседневной человеческой практики. Теперь он интересует не только физика и астрофизика, но и светотехника, определяющего яркости дорожных покрытий при искусственном освещении, военного инженера, изучающего фактуру естественных фонов и маскировочных материалов, специалиста по обработке поверхностей, характеризующего их доводку степенью глянца, и т. д.

После Бугера ряд первоклассных ученых посвящает рассеянию света матовыми поверхностями фундаментальные исследования. Однако и поныне нет ни теоретически обоснованных, ни даже эмпирических соотношений, позволяющих сколь-либо удовлетворительно характеризовать „фактуру“ шероховатых поверхностей и рассчитывать пространственное распределение

отражаемого ими света. Это показывает, что вопрос действительно трудный.

И поныне при практических расчетах почти всегда исходят из носящего имя Ламберта закона, гласящего, что сила света элемента поверхности изменяется пропорционально косинусу угла излучения или, иначе говоря, что яркость поверхности одинакова по всем направлениям. Для отражающих поверхностей этот закон во всех случаях применим лишь приближенно и притом с допустимой погрешностью лишь для весьма узкого класса поверхностей. Широта использования этого закона в практике определяется не столько его справедливостью, а скорее его простотой и отсутствием других общепризнанных закономерностей. Соотношение, введенное в дальнейшем Ламбертом на основании весьма скромного ассортимента опытов в ранг закона природы, было для Бугера лишь самым грубым и далеко не всегда допустимым приближением, о чем свидетельствовали ему многочисленные и разнородные измерения.

Как представлял Бугер картину отражения света шероховатыми поверхностями? Он, как и до него Галилей, считал, что шероховатые поверхности имеют множество выпуклостей и впадин, и обращенные в различные стороны грани этих неровностей отражают свет по всем направлениям. По мнению Бугера, изучение распределения отражающих граней по их ориентации дает знание законов отражения света данной поверхностью.

Итак, основная идея Бугера заключается в том, что закономерности отражения света телами с матовыми поверхностями определяются чисто геометрически топографией этих поверхностей, иначе говоря тем микрорельефом, к изучению которого привлекают теперь внимание задачи оценки „качества поверхностей“ при их обработке.

Бесчисленные и обращенные в разные стороны крошечные склоны могут, по мнению Бугера, рассматриваться как миниатюрные зеркала, от каждого из которых свет отражается по закону — „угол отражения равен углу падения“, причем

свет, отраженный отдельными микрозеркалами в одном и том же направлении, складывается.

По мнению Бугера, каждая поверхность характеризуется некоторой функцией, дающей суммарную площадь элементарных зеркальных граней в зависимости от направления их нормали. Микрограммы для большинства поверхностей можно считать расположеннымими хаотически и принимать, что их число зависит только от угла, образуемого направлением их нормали с направлением перпендикуляра к макроповерхности. Коэффициент отражения света зеркальными гранями Бугер принимает не зависящим от угла падения. На возможность затенения одних граней другими (микротени и экранирование отраженного света) Бугер указывает, но его не учитывает.

Искомая функция распределения граней, по мнению Бугера, может быть определена экспериментально, если исследуемую поверхность, придавая ей разный наклон, освещать удаленным источником света и измерять ее силу света в направлении, обратном направлению падающего света. Сила света, как считает Бугер, будет в этом случае пропорциональна освещенности перпендикулярно падающими лучами и площади граней, смотрящих в данном направлении. Откладывая в полярных координатах значения силы света в зависимости от угла падения, получаем кривую, названную Бугером „la numératrice des aspérités“, что переведено: „нумератриса неровностей“. Такие кривые были определены Бугером для матового серебра, гипса и бумаги. Трудной, но разрешенной Бугером задачей явилось нормирование рассматриваемой функции, то есть определение абсолютных значений радиусов-векторов нумератрисы неровностей.

Если луч зрения наблюдателя не совпадает с падающими лучами, то, по Бугеру, расчет ведется следующим образом. Находится направление, лежащее в плоскости падающего и отраженного лучей и делящее угол между ними пополам. Радиус-вектор полярной кривой (нумератрисы неровностей), соответствующий этому направлению, определяет площадь граней, отражающих свет к наблюдателю. Умножив его значение на

освещенность этих граней (а не макроповерхности), получаем величину, пропорциональную силе света поверхности в данном направлении. Деля силу света на площадь проекции поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения, получаем яркость поверхности. Такова, насколько можно судить по трактату, принципиальная схема расчета, которую Бугер, восходя от частных случаев к общим, излагает языком геометрических построений.

На основании построенной теории Бугер решает ряд частных задач, связанных с расчетом яркостей света, отраженного матовыми поверхностями. Созданную теорию Бугер применяет к изучению отражения света планетами и их спутниками и, в частности, Луной. Исходя из эмпирического соотношения, согласно которому радиус-вектор нумератрисы неровностей пропорционален  $a \cos \delta + b \cos^m \delta$ , где  $a$ ,  $b$  и  $m$  — постоянные,  $\delta$  — угол с нормалью, Бугер вычисляет распределение яркости по диску планеты и зависимость общего количества отражаемого ею к земле света от фазового угла (угла между направлением падающих на нее солнечных лучей и направлением на земного наблюдателя).

Теория отражения света матовыми поверхностями и ее применения к фотометрии планет изложены Бугером в трактате далеко не просто, расшифровка сущности и деталей построений Бугера требует много труда, а порою и догадок; в научной литературе теория Бугера, повидимому, сколь-либо обстоятельно до сих пор не пересказывалась, ее изложение ограничивалось, как правило, исходными предпосылками, как, например, в посвященной памяти Бугера и Ламберта книге Целльнера\* и работе Зеелигера.\*\* Однако, если детали теории Бугера

\* F. Zöllner. Photometrische Untersuchungen mit besonderer Rücksicht auf die physische Beschaffenheit der Himmelskörper. Leipzig, 1865.

\*\* H. Seeliger. Zur Photometrie zerstreut reflectirender Substanzen. Sitzungsberichte des mathematisch-physikalischen Classe der Akademie der Wissenschaften zu München. 1889.

оказались забытыми раньше, чем они смогли быть использованы другими исследователями, то положенные в основу теории представления и поныне успешно служат в науке.

Многие теоретические и экспериментальные работы, выполненные в прошлом и текущем столетиях, являются попытками опровергнуть исходные положения теории Бугера или, что чаще, их подтвердить, уточнить и применить. Авторы работ, опубликованных по этому вопросу за последние десятилетия, уточняют теорию Бугера, исходя из Гауссовского распределения микрограней по отношению к макроповерхности, принимают, что коэффициент отражения от микрограней, подчиняясь формулам Френеля, зависит от угла падения на них света. В ряде случаев видоизмененная теория Бугера оказывается безупречной. Так, например, сравнительно недавно было показано, что при изучении отражения света дорожными покрытиями, можно заменять поверхность дороги системой из бесконечного числа разноориентированных полированных граней. Эксперименты подтверждают справедливость этой гипотезы. Построенная на ее основе теория удобно и достаточно точно охватывает результаты измерений, позволяет просто и быстро строить кривые равной яркости на перспективном изображении дороги, освещенной источником света с заданным светораспределением.

Гипотеза Бугера может с успехом служить при описании явлений отражения света волнующейся поверхностью моря, например при расчетах распределения яркости в солнечной и лунной дорожках при различных высотах светил и разной степени волнения.

Эти примеры показывают жизненность представлений Бугера об отражении света негладкими поверхностями. Конечно, теория Бугера не является общей и строгой; в ней больше геометрии, чем физики. Нужно учитывать, что свет проникает в поверхностные слои отраженного тела и рассеивается ими. Г. И. Покровский в своих работах 1924—1926 гг. принимал, что отражение света определяется как Бугеровым зеркальным отражением от граней внешней поверхности, так и рассеянием

света прилежащими к поверхности слоями. В ряде случаев необходимо учитывать дифракцию падающих световых волн на неровностях, интерференцию волн, отраженных отдельными элементами поверхности.

Строгая волновая теория диффузного рассеяния при малых шероховатостях была создана Л. И. Мандельштамом, изучавшим флуктуационное рассеяние света на свободных поверхностях жидкости, считая их непрерывно деформирующими вследствие теплового движения.

Степень применимости представлений Бугера очевидно определяется характером поверхностного слоя, соотношением размеров неровностей и длин волн падающего света, условиями освещения и наблюдения.

Можно отметить, что теории отражения света шероховатыми поверхностями Бугером былоделено особо много внимания, а сколь-либо заметной роли в развитии оптики эта столь детально разработанная теория не сыграла, в то время как другие, порою лишь мимоходом поднятые в трактате вопросы остались заметный след в истории оптики. Повидимому, здесь повлияли трудность изложения теории и сложность выполнения по ней расчетов.

Практика пошла по пути применения закона Ламберта, предельно простого и к тому же кажущегося теоретически обоснованным.

Теория диффузного отражения, данная Бугером, конечно устарела, но все же степень ее забвения не соответствует возможности ее использования в видоизмененной форме и при современном уровне развития науки.

*Третья книга* трактата, достойно его завершающая, посвящена изысканиям о прозрачности и непрозрачности тел. В ней устанавливается показательный (экспоненциальный) закон ослабления света при его прохождении через поглощающую среду, рассматриваются различные следствия из этого закона и исследуются вопросы рассеяния света и его прохождения через атмосферу и морскую воду.

Особый интерес представляет первый раздел „О законе, которому подчинены изменения света, проходящего сквозь различные толщи прозрачного тела“.

Бугер устанавливает как экспериментально, так и теоретически закон, записываемый в настоящее время в виде

$$F = F_0 e^{-kx},$$

где  $F_0$  — начальное количество света, а  $F$  — количество света после прохождения пути  $x$  в поглощающей среде, где  $k$  — константа, характеризующая поглощающую способность этой среды.

Этот закон приобрел величайшее значение в физике и технике как один из наиболее общих и строгих законов природы. Закон Бугера выдерживает жесточайшую экспериментальную проверку. С. И. Вавилову удалось доказать на опыте справедливость закона Бугера при изменении плотности падающего светового потока в  $10^{19}$  раз.\* При этом поглощающее вещество (желатиновый слой, окрашенный родамином) было таково, что поглощение сопровождалось различными вторичными процессами, как то: нагреванием, флуоресценцией, фотохимическим разложением. При изменении плотности падающего лучистого потока от  $10^{-11}$  до  $10^8 \frac{\text{эрг}}{\text{сек. см}^2}$  показатель поглощения оставался неизменным. Отступления от закона Бугера, как показали в 1926 г. С. И. Вавилов и В. Л. Левшин, могут наблюдаться лишь при особо больших длительностях возбужденных состояний молекул (например, при фотолюминесценции урановых стекол).

Экспоненциальный закон был установлен Бугером для поглощения видимого света, но ему подчиняется ослабление прямого потока энергии, который несет любого вида однородная радиация. Область его применения непрерывно расширялась вместе с раз-

\* С. И. Вавилов. О независимости коэффициента поглощения света от яркости. Поглощение света ничтожно малых интенсивностей. Известия Физического института при Московском научном институте. Том I, выпуск III, М., 1920.

витием науки, и он сейчас, скажем, столь же привычен лицам, рассчитывающим поглощение рентгеновых и гамма-лучей, как и фотометристам. Это позитивно, поскольку к данному закону непосредственно приводит обычно выполняющееся соотношение

$$\frac{dF}{F} = -kdx,$$

где  $\frac{dF}{F}$  — относительное изменение потока радиации при прохождении пути  $dx$ . Установление экспоненциального закона следует рассматривать как крупнейшее научное открытие. Предшественникам и современникам Бугера представлялось естественным, что при последовательном прохождении равных толщин количество света ослабляется на равные порции (а не на равные доли) до полного исчезновения. Не следует этому изумляться. Некоторые исследователи еще в прошлом столетии пытались определить абсолютное значение предельной глубины проникновения дневного света в толщу моря, не сознавая, что на самом деле они лишь измеряли порог чувствительности приемников света в погружавшихся в море измерительных устройствах.

Содержание третьей книги трактата в значительной мере заимствовано Бугером из его первого большого труда по фотометрии — „Опыта о градации света“, изданного в 1729 г. Уже в этом первом труде дается полное экспериментальное и теоретическое доказательство экспоненциального закона и выводится большое число следствий из него. Через тридцать один год после выхода этой книги Бугера, а именно в 1760 г., Ламберт публикует свой бессмертный труд по фотометрии — „Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae“. Он излагает закон ослабления света в той же форме, что и Бугер, и ссылаясь на него. Поэтому досадной ошибкой в истории физики следует признать забвение генезиса закона поглощения, в результате чего этот закон получил имя ЛамBERTA, на что последний и сам, конечно, никогда не стал бы претендовать. Как писал акад. С. И. Вавилов еще в 1924 г.: „Во всяком случае, имя Бугера в истории оптики должно

стоять наряду с именами Ньютона и Гюйгенса... Трудно постигнуть основание той упорной исторической несправедливости, с которой до нашего времени законы, совершенно ясно и отчетливо формулированные Бугером, соединяются с именами других авторов (закон Беера, законы Ламберта и пр.)".\*

На эту ошибку теперь обратили внимание и другие авторы.\*\*

В первой главе третьей книги трактата Бугер на основании прямого опыта говорит о том, что „свет, проходя однородные и одинаково толстые слои прозрачного тела, не уменьшается согласно членам арифметической прогрессии“. Во второй главе Бугер, на основании логических умозаключений, утверждает что „при возрастании толщин на равные величины свет уменьшается, подобно членам геометрической прогрессии“. В третьей главе — „Об использовании логарифмической кривой для представления ослабления света“ — Бугер показывает, что количества света, прошедшего через различные толщи тела, выражаются ординатами логарифмической кривой, причем каждой среде соответствует своя кривая в зависимости от ее прозрачности. Бугер устанавливает в следующей, четвертой главе меру прозрачности, говоря, что „веществами в пять или шесть раз более прозрачными будут те, которые вызывают то же ослабление света, будучи взяты в пять или шесть раз более толстыми“. Показателем прозрачности у Бугера служит подкастельная логарифмической кривой, то есть величина, пропорциональная „свободной длине пути“  $\frac{1}{k}$ , где  $k$  — показатель поглощения. Эту величину Бугер называет „удельной прозрачностью“. В пятой главе Бугер указывает, что „непрозрачные тела непрозрачны не потому, что они полностью преграждают путь свету, а потому, что... они заставляют его претерпевать ослабление слишком сильное, чтобы он мог затем оказывать

\* С. И. Вавилов. Пьер Бугер. Опыт о градации света. Успехи физических наук, том IV, вып. 2—3, 1921.

\*\* F. H. Perrin. Whose Absorption Law? Journal Optical Society America, vol. 38, N 1, January 1948.

заметное впечатление на наши глаза“. Отметим, что в „Трактате“ Бугер оставляет в стороне рассмотрение физической сущности явления поглощения света, чему посвящена отдельная глава в первом труде Бугера „Опыт о градации света“, представляющая безусловный интерес для истории физики.

Во втором разделе третьей книги трактата излагается „способ вычисления сил светов, проходящих различные толщи прозрачных тел, когда лучи вполне параллельны“. Исходя из установленного им закона, Бугер принимает, что „когда свет проходит через различные толщи одного и того же тела, то отношение разности логарифмов двух ординат или количеств света... к толще..., заключенной между ними, всегда таково же, как и отношение между разностью логарифмов двух любых других ординат или количеств света и соответствующую толщиною“. Далее Бугер переходит к решению, исходя из этого принципа, следующих, практически важных, частных задач:

„Найдя... часть света, проходящую сквозь данную толщу тела, обладающего повсюду одинаковой прозрачностью, определить часть света, проходящего сквозь все другие толщи того же тела“.

„Зная уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении известной толщи прозрачного тела, найти толщину, на которую свет должен проникнуть в это же тело, дабы претерпеть любое желаемое уменьшение“.

„Зная... уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении некоторой толщи различных прозрачных тел, найти удельную прозрачность этих тел“.

„Найти подкасательную логарифмической кривой (удельную прозрачность, — А. Г.), свойственной прозрачному телу“.

„Зная из опыта уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении известной толщи прозрачного тела, определить толщину, которую необходимо придать телу, дабы сделать его непрозрачным“.

При решении последней задачи Бугер принимает, что солнце становится невидимым, если его свет ослабить в девятьсот

миллиардов раз. Бугер приводит это значение с двенадцатью знаками, но приходит к нему из неверных расчетов (не учитывая многократных отражений в стопе стекол).

В третьем разделе третьей книги трактата дается для случая прохождения света через поглощающее тело „способ вычислять силы света в том случае, когда светящее тело не удалено на бесконечное расстояние“, то есть когда пучок света не является параллельным. Содержание этого раздела не представляется ныне существенным. Этот раздел разбивается на три задачи:

Первая задача: „Сравнить в общем виде различные силы, коими обладает свет на различных расстояниях от светящегося тела, когда этот свет проходит сквозь тело, повсюду одинаково прозрачное“.

Вторая задача: „Установить заданное отношение между светом, воспринимаемым непосредственно от светящегося тела, и светом, воспринимаемым с того же расстояния после прохождения сквозь прозрачное тело“.

Третья задача: „Два светящихся тела... расположены на некотором расстоянии друг от друга в среде, повсюду одинаково прозрачной; требуется найти отношение, которое существует между их светами, когда последние воспринимаются в заданных точках..., или, напротив, найти, в каких точках... надлежит воспринимать эти светы, если угодно, чтобы последние находились в некотором заданном отношении“.

Изложение этого раздела строится следующим образом. За описанием общей задачи следуют пояснения, а затем решения, соответствующие отдельным частным ее формулировкам.

. Значительно больший интерес представляет раздел четвертый — „Об уменьшении, претерпеваемом светом, проходящим сквозь тела, не везде одинаково плотные“. В начале этого раздела Бугер пишет:

„...естественно полагать, что большие или меньшие сгущения вызывают в неравномерно сгущенном теле в точности

такое же действие в отношении пресечения пути лучам, что и большие или меньшие толщины в теле, имеющем повсюду одну и ту же плотность. Свет может претерпевать равные изменения лишь встречая равное число частиц, способных задерживать лучи или рассеивать их; однако для того чтобы свет встречал равное число этих частиц, необходимо, чтобы он проходил сквозь меньшие или большие толщи, смотря по тому, насколько более или менее плотна среда... Отсюда надлежит сделать вывод, что в нашем случае пропорциональными различиям логарифмов различных количеств света являются не толщины..., а массы вещества, содержащиеся в этих толщинах".

Столетием позже, в 1852 г., А. Беер в своей работе об определении поглощения света окрашенными жидкостями приходит к выводу, что при заданном пропускании концентрация и толща обратно пропорциональны. Однако, как видно из приведенной выше цитаты, это положение было высказано задолго до Беера в совершенно ясной форме Бугером. Таким образом, нет оснований говорить о законе Беера, законе Ламберта — Беера, законе Бугера — Ламберта — Беера.

Бугер принимает, что в случае среды переменной плотности удельная прозрачность обратно пропорциональна плотности или, иначе говоря, показатель поглощения  $k$  пропорционален плотности в данной точке среды, в соответствии с чем закон ослабления света принимает вид

$$F = F_0 e^{-\int k \cdot dx}.$$

Дальше Бугер переходит к рассмотрению вопросов о прозрачности атмосферы. Ссылаясь на Мариотта, он принимает, что плотность воздуха пропорциональна давлению на данной высоте, и показывает, что отсюда вытекает, что плотность воздуха, так же как и давление, убывает с высотой по экспонциальному закону. Бугер говорит, что это правило хорошо оправдывается, если исключить самые нижние слои атмосферы,

и показывает, ссылаясь на свои высокогорные наблюдения в Перуанских Кордильерах, как следует наилучшим способом определять с помощью барометра высоту гор.

Попутно Бугер на основании расчетов и своих наблюдений отмечает, что на больших высотах, где воздух более разрежен и заметная доля его расположена ниже, земные предметы видны на большее расстояние, а свет звезд более ярок, чем у поверхности земли.

Далее Бугер переходит к расчету масс воздуха, сквозь которые должны проходить лучи небесных светил перед тем, как достигнуть земной поверхности. Вначале он рассматривает случай, когда светило находится в зените, и для этого подсчитывает наиболее вероятные значения подкасательной той логарифмической кривой, которая определяет зависимость плотности воздуха от высоты. Бугер говорит:

„Если бы атмосфера имела повсюду ту же плотность, что и у поверхности земли, то она не простиралась бы на столь большое расстояние от земли, а просто имела бы высоту в 3911 или в 4197 туаз; таким образом, подобная толща плотного воздуха была бы равноденна действительной высоте атмосферы, которую пронизывает свет небесных светил, находящихся в зените“.

Итак Бугер в совершенно ясной и точной форме использует понятие, именуемое теперь „приведенной высотой атмосферы“.

Он приводит таблицы масс воздуха, пронизываемых лучами светил в зависимости от их возвышения, а также соответствующие значения прозрачности атмосферы.

Приводимые Бугером значения воздушной массы в зависимости от зенитного расстояния практически не отличаются от тех, которые приняты сейчас и которые напрасно связывают с именем Бемпорада.

Пятый раздел посвящен теоретическому изучению прохождения света через рассеивающую среду, каковой являются воздух и морская вода, расчету яркости рассеянного света и дальности видимости. В начале этого раздела Бугер пишет:

„Мы должны исследовать отражение света, проходящего сквозь прозрачное тело, самими молекулами оного; этот свет частично отсылается в направлении к нашим глазам. Действие... происходит лишь с теми лучами, кои задерживаются каждым слоем прозрачного тела, ибо свет, проходящий беспрепятственно, продолжает свой путь далее. Хотя свет, задерживаемый каждым слоем, может считаться бесконечно малым по сравнению с проходящим светом, тем не менее следует принять во внимание, что множество слоев является бесконечным, и это может привести к тому, что отраженный свет будет вполне сравнимым с проходящим. Также не имеет значения и то, производится ли отражение частицами прозрачного тела или каким-либо флюидом, содержащимся в порах последнего. Для нас это совершенно безразлично, ибо мы, не связывая себя частной гипотезой, будем довольствоваться наблюдением фактов и извлечением из них лишь непосредственно следующих заключений...“.

Бугер дает способ расчета яркости освещенной мутной среды, в которой, наряду с поглощением, происходит также рассеяние света. Это позволяет Бугеру вычислять яркость рассеянного атмосферой света, яркость неба для наблюдателя, находящегося на заданной высоте над уровнем земли, и яркость воздушной дымки, застилающей для него земной ландшафт. При этом Бугер указывает, что синие лучи рассеиваются сильнее красных, что рассеянный свет сосредоточивается в основном по направлениям вперед, что назад света рассеивается меньше.

Бугер строит безупречную теорию видимости предметов через освещенную мутную среду. Теория учитывает, что по мере удаления от наблюдаемого предмета яркость доходящих от него лучей падает вследствие поглощения и рассеяния света средой, но на нее налагается все возрастающая яркость дымки, обусловленной рассеянием в толще среды между наблюдателем и предметом. При этом видимый яркостный контраст между предметом и фоном падает, и, при достижении порогового значения контраста, предмет становится невидимым. Бугер

применяет построенную им общую теорию к расчету предельной глубины видимости погруженных под воду предметов, к расчету дальности видимости удаленных деталей ландшафта, к толкованию вопросов воздушной перспективы. При этом Бугер учитывает, что разные слои среды (воды, воздуха) по-разному освещены, что плотность воздуха, а следовательно и рассеяние, на различных высотах различны. Соотношения, приводимые Бугером, совершенно правильны, и можно лишь сожалеть о том, что они столь долго оставались в забвении. Итак, Бугера следует считать творцом и той главы фотометрии, которую целесообразно называть геофотометрией.

Трактат завершают следующие слова Бугера:

„Все эти вопросы, несмотря на все наши попытки дать им объяснение, оставляют, конечно, весьма широкое поле изысканий для любознательных лиц. Мы признаемся в этом чисто-сердечно и с удовольствием предоставляем другим преимущество завершить то, что мы смогли лишь едва начать“.

E S S A I  
D'OPTIQUE,  
S U R  
LA GRADATION  
DE LA LUMIERE.

*Par M. BOUGUER, Professeur Royal en  
Hydrographie.*



A P A R I S ,

Chez CLAUDE JOMBERT , rue S. Jacques ,  
au coin de la rue des Mathurins ,  
à l'Image Notre-Dame .

---

M. D C C X X I X .  
*Avec Approbation & Privilege du Roi.*

Титульный лист первой книги по фотометрии Пьера Бугера (1729 г.).

Nous n'avons pas reçu M. Clairaut et son Anglaise  
il ~~a~~ut le temps des pieces des prix avant son départ, et il nous a promis  
d'envoyer de retour avant d'agréer pour convenir avec les autres  
Commissaires. On ne peut quitter la des choses considérables de votre  
ami M. Kastensteink ; l'estime que vous proposiez avoir pour long est  
un titre qui suffit pour que nous le montrions très favorable. Votre mare  
part l'heureux de me parler dans quelques-unes de vos lettres précédentes  
de Berlin qu'il avait fait sur l'architecte ravale et que aurait donc  
vous a-t-il fait faire pour ce rendre les particularités de sa tentative, avec  
un plan du Marais, un devis de la nature de? Si l'avis avoir  
bute ces choses et que vous vouliez bien faire part, je vous en ferai  
infiniment oblige et ~~comme~~ je pourrai parler si à quelqu'un à grande  
peine pourront être adresses, pour mesurer des frais du port. Vous  
voudrez bien excuser les griffonnages de cette lettre, que je n'ai pas le  
courage de rebiffer. Vous voyez que le papier me manque. Je profite du peu que  
je reste pour vous remercier les autorités de mon attachement faire de  
se la considération parfaite avec laquelle j'aurai envie  
à Paris nre des Postes le 23 nov. 1752.  
Boufflers

Факсимile Пьера Бугера.

(Из письма Леонарду Эйлеру от 23 ноября 1752 г.; хранится в Архиве Академии Наук СССР).



Пьер Бугер (1753 г.).  
С портрета работы Ж. Б. Перроно.

БУГЕРОВО  
Новое Сочиненіе  
о  
**НАВИГАЦІИ**  
содержащее  
теорію и практику  
морскаго пути.

съ французскаго перевелъ Математичес-  
кихъ и Навигацкихъ Наукъ Учитель  
Николай Кургановъ.

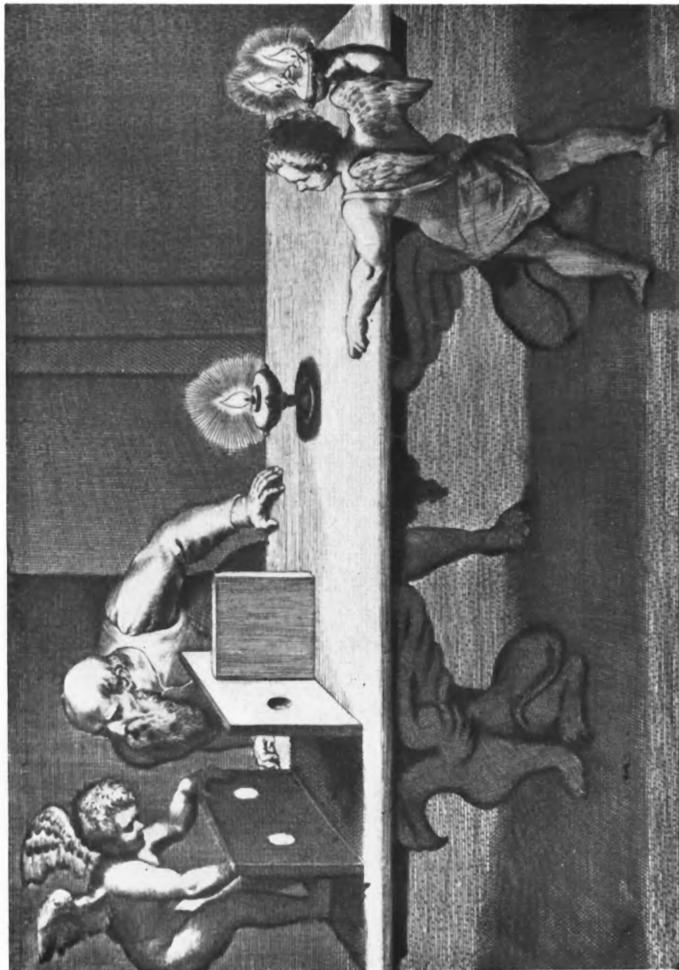


oooooooooooooooooooooooooooo

въ САНКТПЕТЕРБУРГѣ.

при Морскомъ Шляхетномъ Кадетскомъ  
Корпусѣ 1764 года.

Титульный лист первого русского издания сочинения Пьера Бугера.



П. Рубенс. Заставка в книге об оптике Францискуса Агвилониуса (1613 г.).