

РАБОТЫ А. Г. СТОЛЕТОВА ПО ФОТОЭФФЕКТУ

Н. С. Хлебников, Москва

I. Среди имен первых исследователей фотоэлектрических явлений, — имен тех людей, труды которых воплотились в наши дни в многочисленные технические достижения, — имя А. Г. Столетова занимает одно из наиболее почетных мест.

Работы А. Г. Столетова, посвященные фотоэффекту, относятся к тому периоду развития этой области, который характеризуется первоначальным накоплением экспериментального материала и поисками основных общих направлений систематического исследования. Действительно, первая работа Столетова была напечатана в 1888 г. — на следующий год после опубликования Г. Герцем его наблюдений над влиянием ультрафиолетового света на разряд индуктора, а последняя — датируется 1891 г.

За этот короткий промежуток времени А. Г. Столетовым был установлен целый ряд важных фактов, характеризующих основные черты явления, и разработана классическая методика его экспериментального исследования. Преждевременная смерть оборвала эти важные работы.

Для того чтобы уяснить роль исследований Столетова, необходимо отдать себе отчет в том уровне сведений о явлениях, связанных с внешним фотоэффектом, который существовал в конце 80-х и начале 90-х годов. Без этого, т. е. без верной исторической перспективы, невозможно ни понять значения, которое имели работы Столетова в то время, ни оценить те трудности, с которыми ему приходилось сталкиваться как в отношении интерпретации результатов, так даже и в самой постановке и проведении опытов.

Прежде всего необходимо иметь в виду, что конец 80-х и начало 90-х годов — это как раз период торжества электромагнитной теории Фарадея-Максвелла-Герца — торжества, созданного опытами Герца (1887 г.). Это означало господство волновых представлений о лучистой энергии в применении к взаимодействию с материей, на основе которых (как выяснилось в дальнейшем) ничего нельзя понять во внешнем фотоэффекте. Еще более существенными на этом этапе являлись

господствовавшие взгляды на природу электричества, основанные на этой теории. Вслед за Фарадеем, Максвелл и особенно Герц перенесли центр тяжести электрических явлений в эфир, отвлекшись от всех доказательств корпускулярной структуры электричества. Так, например, Герц в отношении катодных лучей, которые совершенно явственно вели себя, как потоки частиц электричества, отклоняясь в магнитном и электрическом полях, считал, что они также представляют собой возмущения в эфире, возникающие в результате импульсивных разрядов у поверхности катода¹. Это обстоятельство ясно ощущается в работах Столетова, посвященных исследованиям фотоэффекта при атмосферном давлении. Устанавливая закон тока насыщения, он говорит о том, что величина тока пропорциональна плотности заряда на поверхностях электродов:

$$i = \varphi \left(\frac{E}{\delta} \right) \varphi(\sigma)$$

(E — разность потенциалов между электродами, δ — расстояние между ними, σ — плотность заряда), но сейчас же отказывается от этой «фикции» и возвращается к «электрической силе, действующей у поверхности пластин».

Тем не менее идея заряда, как чего-то материального, сквозит в рассуждениях Столетова, как здесь (нет никакой необходимости переходить от градиента потенциала $\frac{E}{\delta}$ к электри-

ческой силе через плотность заряда σ , так как $\frac{E}{\delta}$ как раз и дает напряженность поля), так и в других местах, в особенности когда он обсуждает природу фотоэлектрических («актино-электрических») токов, подчеркивая, что их, по всей вероятности, следует считать токами конвекционными.

Все свои опыты Столетов проводил или в атмосфере воздуха при обычном давлении или в не слишком сильно разреженных газах. Это затрудняло понимание явлений, поскольку впервые теория газового разряда была создана лишь в 1900 г. (Таунсендом), причем толчком к ее созданию послужили опять-таки опыты Столетова¹⁷, в которых были обнаружены токи, большие токов насыщения. При работе в воздухе при нормальном давлении, когда получались токи насыщения, не было причин делать различие между первичными и вторичными процессами, т. е. между фотоэффектом и сопровождающими его явлениями газового разряда. Но когда Столетов перенес исследования в разреженный газ², он сейчас же указал, что осложнение картины (отсутствие насыщения) вызывается вторичным явлением. Он считал, что улучшение вакуума приведет к конечным, независимым от потенциала значениям фотоэлектрического тока. Это положение было подтверждено опытами Риги³ в том же 1890 г. и оконча-

тельно установлено в результате исследований Ленарда (1899 г.).

В своих работах Столетов должен был с самого начала строить методику эксперимента и его технику. Он не имел предшественников в выбранной им области, так как опыты Герца, Эберта, Видемана и Галльвакса относились к действию ультрафиолетового света на проводники, находившиеся под весьма высокими потенциалами (искры). Ряд приемов, примененных впервые Столетовым, широко вошел в практику научно-исследовательской работы, как, например, метод эмитирующего (теперь — накаливаемого) зонда для исследования распределения потенциала в междуэлектродном пространстве. Ни один из них не носит, однако, его имени.

II. Свои исследования Столетов начал, имея целью установить, не обнаружатся ли явления, наблюдавшиеся Герцем и другими, при меньших потенциалах. Помимо самого ответа на этот вопрос, он показал, что в том случае, если бы результаты оказались удачными, это представило бы больше возможностей в части количественного изучения явления, поскольку вся измерительная техника для меньших напряжений и проще и позволяет получить большую точность.

Схема расположения основного опыта, который после нескольких неудачных попыток удалось осуществить Столетову

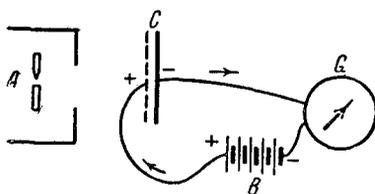


Рис. 1.

9 марта 1888 г., изображена на рис. 1. Перед фонарем с вольтовой дугой А, из которого была удалена вся (стеклянная) оптика, располагались два диска (22 см в диаметре). Один из них, ближайший к фонарю, состоял из металлической (железной, латунной, иногда покрытой электролитически другим металлом) сетки, натянутой на кольцо из толстой проволоки. Второй диск представлял собой сплошную металлическую пластинку. Эти диски были соединены между собою цепью, состоявшей из батареи В и гальванометра Г. Батарея собиралась из элементов Вольта, Даниеля, Беетца, Гасслера или Л. Кларка, причем наиболее часто Столетов пользовался последними элементами. Напряжение между пластинками регулировалось путем включения соответствующего числа элементов (обычно менявшегося в пределах от 1 до 200 V, за исключением некоторых исследований, которые были прове-

дены при самых низких напряжениях — до 0,01 V или совершенно без источника напряжения) и измерялось их числом. Так, например, Столетов говорит, что напряжение между электродами равнялось 100 Clark (1 Clark = 1,43 V). В качестве измерительного прибора был использован высокоомный (5212 Ω) астатический гальванометр Томсона, чувствительность которого без верхнего астазирующего магнита составляла $6,7 \cdot 10^{-10}$ A, при наличии же этого магнита — $2,7 \cdot 10^{-11}$ A. Наблюдение отклонений велось «по английской методе», т. е. с лампой и шкалой.

Обсуждая свойства своего прибора, Столетов делает единственное замечание, с которым не представляется возможным согласиться теперь. Указывая, что при перемене полярности, по сравнению с указанной на рис. 1, на обратную обнаруживаются значительно меньшие токи, чем при обычном расположении, он говорит: «Благодаря свойству передней сетчатой арматуры задняя арматура могла быть освещаемая лучами вольтовой дуги с внутренней стороны, т. е. с той, где преимущественно накапливается электрический заряд. Другая арматура (сетка) освещалась лишь с невыгодной (слабо заряженной) стороны, с внутренней же стороны — лишь лучами, отраженными от сплошного диска». В действительности же здесь дело заключается, во-первых, в том, что освещенная поверхность сетки много меньше, чем у сплошной пластины (изучение зависимости силы фототока от величины освещенной поверхности явилось в дальнейшем предметом специального исследования самого Столетова), а во-вторых, в том, что электрическое поле в этом случае было существенно ослаблено экранирующим действием сетки. Цитированная выдержка представляет особый интерес в другом отношении: она еще раз показывает, что в представлениях Столетова заряд являлся чем-то более материальным, нежели геометрическое место концов силовых линий поля.

Больше всего затруднений в проведении опытов доставила Столетову вольтова дуга, питавшаяся динамомашинной, приводимой в действие двигателем внутреннего сгорания (системе Отто), так как электричество от городской сети было подано в лабораторию лишь в 1889 г. Колебания в числе обрестов двигателя, несмотря на наличие регулятора, вели к таким колебаниям интенсивности ультрафиолетового излучения дуги, которые не давали возможности вести количественные исследования. Это заставило Столетова сначала попытаться установить связь между электрическими режимами дуги и ее излучением, но поскольку это не вело прямо к цели, пришлось разработать непосредственные методы контроля радиации, методы фотоэлектрические.

Эти методы заключались в помещении дополнительного фотоэлемента (имевшего катод в форме креста с перекладинами размером 12×1 см и сетчатый анод той же формы и разме-

ров, укрепленный на эбонитовых прокладках в 2 мм от катода) на пути пучка между основным фотоэлементом и фонарем, питавшимся от отдельной батареи. В первом методе производилось попеременное измерение фототока (первых отбросов) основного и контрольного фотоэлемента на одном и том же гальванометре. Однако по причине большого периода гальванометра (17 сек.) этот метод не всегда давал нужные результаты. Поэтому он был видоизменен в том отношении, что контрольный фотоэлемент (напряжение на котором, расстояние от источника и расстояние между электродами в течение всей серии, а иногда и ряда серий измерений оставались неизменными) замыкался на особый гальванометр (период которого был подогнан к периоду основного); показания его наблюдались одновременно с показаниями основного вторым наблюдателем (И. Ф. Усагиным). Этот метод контроля Столетов нашел вполне удовлетворительным, проверив его на большом числе специальных опытов. Единственным дефектом здесь было различное затухание обоих гальванометров, несколько понижавшее надежность контроля.

Оценивая фотоэлектрический метод контроля интенсивности излучения, Столетов пишет: «Необыкновенная чуткость актино-электрического тока ко всякому изменению дуги не мало затрудняет количественные наблюдения... Едва ли есть другой способ так зорко следить за постоянством электрического света (или, вернее, за напряженностью известной категории радиации), как эти актино-электрические наблюдения».

Мы знаем теперь, насколько прав был Столетов, и что особенно замечательно, это то, что оба впервые осуществленные им метода используются в фотометрии. Так, в книге Симона и Зурмана⁴ «Фотоэлементы и их применения» в разделе «Методы устранения колебаний силы света» (стр. 208 и 209) приведена схема с двумя фотоэлементами и двумя электрометрами, автором которой является Поль⁵. В действительности, принципиально эта схема есть точное воспроизведение второго из описанных выше методов контроля. Там же (стр. 208) описана схема Добсона⁶, тишичная схема для «метода мерцающего света» (Flimmermethode), которая является модификацией первого метода Столетова. Это видоизменение, равно как и вообще применимость метода мерцающего света, было обусловлено появлением высокочувствительных и очень мало инерционных измерительных приборов (струнные электрометры и гальванометры). Дальше в том же разделе книги Симона и Зурмана описан ряд фотометрических приборов, основанных на этих схемах и выпускаемых немецкими фирмами.

Другим обстоятельством, сильно мешавшим при измерениях, являлось открытое Столетовым¹⁾ явление фотоэлектрического

¹⁾ В упомянутом выше обзоре Галльвакса¹ он особенно подчеркивает, что явление фотоэлектрического утомления было открыто Столетовым, а не Крейслером², как полагают обычно.

утомления, заключавшееся в понижении чувствительности его фотоэлементов (или, как он их называл, конденсаторов) с течением времени под действием света. Это особенно сказывалось на контрольном фотоэлементе, подвергавшемся более интенсивному освещению.

С помощью описанной установки Столетовым было проведено большинство его исследований.

III. Прежде всего Столетов совершенно точно установил, что разряжающее действие ультрафиолетовый свет оказывает только на отрицательно заряженный электрод, — взгляд, который он высказал в своих первых публикациях^{8,9}, которого придерживались Видеман и Эберт¹⁰ и против которого выступили Галльвакс¹¹) и Риги¹². Когда этот последний автор убедился в ошибочности своих утверждений¹³, он пытался предоставить дело так, что не он, а Столетов сомневался в нечувствительности положительного электрода¹⁴. По этому поводу Столетов пишет: «более бесцеремонного способа сваливать свои грехи на чужую голову мне никогда еще не встречалось».

Какие же вопросы занимали Столетова? Во-первых, он посвятил много времени сравнению фотоэлектрических свойств различных металлов и различным состояниям металлических поверхностей. В отношении металлов никаких существенных различий обнаружено не было. Столетов пишет: «Если поверхность гладка и хорошо очищена, всякий металл оказывается почти одинаковым с этой стороны». Зато состояние поверхности оказалось очень существенным: чем лучше очистка и полировка, тем чувствительность выше: С другой стороны, свежеччищенная поверхность оказывается более сильно утомляющейся.

Вопрос о связи между свойствами вещества, обнаруживающего фотоэффект, характером излучения и величиной эффекта глубоко интересовал Столетова. В этом направлении им был проделан ряд опытов, но окончательных выводов на их основании сделать было нельзя — для этого был нужен совершенно иной уровень экспериментальной техники, достигнутый лишь спустя 10—15 лет.

Свой взгляд на природу фотоэффекта, который ему отчасти удалось подтвердить, Столетов высказал следующим образом: «С самого начала моих исследований я заподозрил, что в прямой связи с поглощением активных лучей той или другой пластинкой стоит ее чувствительность к актино-электрическому действию...» и далее: «Уже самая униполярность дей-

1) В ранних опытах Галльвакса эта ошибка была обусловлена тем, что наблюдения велись с электроскопом, заряд которого стекал просто за счет несовершенной изоляции. Галльвакс¹¹ писал: «При положительном заряде спадание листочков (электроскопа. — Н. Х.) на первый взгляд отсутствует, но при внимательном исследовании становится заметным по истечении длительного срока». Метод, разработанный Столетовым, благодаря наличию батареи был свободен от этого недостатка.

ствия показывает, что электроды... играют в явлении существенную роль... Лучи, которые освещают воздушный слой, не задевая поверхности (отрицательно) заряженного тела, не производят действия (Галльвакс): лучи должны падать на нее. Мало того, лучи должны поглощаться отрицательно заряженной поверхностью. Очевидно, важно при этом поглощение в тончайшем верхнем слое...»

Проверяя этот взгляд, Столетов покрывает катод своего прибора различными сильно поглощающими красками и находит, что во многих случаях (фуксин, эозин, флуоресцеин, метилвиолет, метилгрюн и др.) чувствительность такого электрода оказывается в несколько раз выше, чем у любого металла. По поводу этих опытов Галльвакс в своем обзоре¹ говорит, что они не подтвердили непосредственно высказанных Столетовым взглядов, но подчеркивает, что они были первыми, направленными к установлению связи между абсорбцией света и фотоэффектом, равно как и то, что мысль об этой связи была впервые высказана Столетовым.

К тому же кардинальному вопросу Столетов вернулся еще раз, в связи с обнаруженным им фактом, что фототок можно наблюдать и без наличия батареи, если контактная разность потенциалов имеет надлежащее направление. Здесь он говорит так: «Система Zn, Ag и воздух при условии освещения Ag активными лучами... обращается в настоящий гальванический элемент. Принимая в расчет, что при этом лучи должны поглощаться серебром, мы можем сказать (в чем бы ни состоял механизм явления), что энергия тока в этом воздушном элементе возникает за счет энергии освещающих лучей».

Из этого видно, насколько близок был Столетов к пониманию истинной природы фотоэффекта еще в 1889 г. Однако формулировка этого закона была дана лишь в 1905 г. Эйнштейном, опиравшимся на электронную теорию (1895 г., Лоренц), теорию квантов (1900 г., Планк) и данные о предельных скоростях фотоэлектронов (1901 г., Ленард).

В связи с исследованиями влияния поверхности следует упомянуть о проверке Столетовым опытов некоего Гоора¹⁵, решившего доказать, что фотоэффект следует приписать исключительно адсорбированным слоям газа. Гоор, в частности, полагал, что он удаляет адсорбированные газы, нагревая пластинки до... 55°C. Потратив много времени на проверку, Столетов отозвался об этой работе, как о «по всем пунктам легкомысленной». Сам Столетов нашел, что нагревание дает некоторое повышение чувствительности.

Наконец, имея в виду исследовать фотоэффект при разном спектральном составе излучения, Столетов проводит опыты с введением в угольную дугу различных металлов, в особенности алюминия, на который Столетов особенно рассчитывал, так как этот металл обладает весьма протяженным ультрафиолетовым спектром. Оказалось, что применение Al увеличи-

чивает эффект в некоторых случаях до 19 раз. Столетов указал наиболее удобный способ введения Al — в виде фитиля положительного угля. Этот метод был впоследствии использован Риги, Галльваксом и другими авторами. У Столетова эти опыты дальнейшего развития не получили, так как крайнее непостоянство горения таких дуг с металлическими парами не давало возможности вести количественные исследования.

Точно так же Столетов пытался применить другой имевшийся в его распоряжении источник излучения — солнце, но не обнаружил никакого действия солнечного света.

Обычно имя Столетова связывают только с теми работами, которые были им вполне закончены, особенно с установлением существования тока насыщения. Из предыдущего видно, что это неправильно, так как его работами было намечено большое число направлений исследования, которые только не были продолжены в силу причин, указанных ранее, и были развиты значительно позже.

Фундаментальные результаты по фотоэлектричеству, найденные Столетовым, заключаются в установлении прямой пропорциональности между количеством световой энергии и силой фототока, а также в установлении (с доступной ему точностью) безинерционности фотоэффекта.

Опыты, приведшие к установлению этих законов, обращают на себя внимание тщательностью их проведения, о которой некоторое представление дает описанная выше разработка методики контроля. Другой характерной чертой их является стремление проверить результаты, полученные одним методом, путем использования других приемов и крайне внимательное отношение к возможным источникам ошибок. Все это характеризует Столетова как экспериментатора не только с большой инициативой, но и с огромной тщательностью в работе — качество столь же важное, как и первое. Оба они, а также третье — стремление к обобщению результатов и созданию цельной картины явления, «дар предвидения», в основе которого лежит именно это умение видеть явление со многих сторон, равно как и строгое отношение к легкомыслию и недобросовестности — все это роднит Столетова с другим крупнейшим исследователем — Э. Резерфордом.

При установлении линейности зависимости между фототоком и количеством световой энергии Столетовым было использовано три метода: а) убывание освещенности с расстоянием (главный и контрольный фотоэлементы); б) изменение фототока в зависимости от величины освещаемой поверхности и с) метод вращающегося диска. Особенно интересны опыты, сделанные по этому последнему методу, так как они, во-первых, привели к постановке вопроса об инерционности фотоэффекта и к установлению отсутствия таковой (с точностью до 0,001 сек.), а во-вторых, потому что соответству-

ющая установка Столетова является прототипом всех современных установок для измерения инерционности фотоэлементов с механической модуляцией светового потока (перфорированные диски).

По установлению прямой пропорциональности между световым потоком и силой фототока Столетов смог приступить к изучению влияния разности потенциалов и расстояния между электродами на величину — как он считал — фотоэффекта. Здесь он еще не делал различия между первичным явлением, т. е. самим фотоэффектом, и вторичным движением электричества через газ. Но открытый в результате этого исследования закон тока насыщения дал ему основания произвести такое разделение в его последней работе, где фотоэффект наблюдался в среде разреженного газа. Это, вместе с его взглядами на природу фотоэффекта, цитированными выше, заставило его считать, что фотоэффект может быть наблюдаем в самом чистом виде в наивысшем вакууме.

Заканчивая обзор фотоэлектрических исследований Столетова, нужно остановиться еще на двух отмеченных им фактах. Первый из них был открыт во время исследования зависимости силы фототока от количества света. Измеряя фототок при косом освещении фотокатода, причем световой пучок был сделан при помощи кварцевой линзы параллельным и всегда полностью вписывался в катод, он обнаружил для металлической поверхности, закопченной с целью уменьшить отражение, заметное (на 5—10%) увеличение тока. Столетов говорит, что этот результат остался для него непонятным. Он смог быть объяснен лишь значительно позже, после открытия Полем и Прингстеймом векториальной селективности фотоэффекта.

Второй из упомянутых фактов еще раз подтвердил представления Столетова о существовании энергетического обмена между излучением и испускающим заряды электродом. При установлении закона тока насыщения Столетов наряду с обычным методом — наблюдением постоянного тока под действием освещения — вел также наблюдения при отъединенной батарее¹⁾. В этом случае фотоэлемент был зашунтирован конденсатором большой емкости (0,05 μF), на котором имелся заряд от батареи, постепенно стекавшей через фотоэлемент. Зная емкость и силу разрядного тока, нетрудно было вычислить время разряда, которое хорошо согласовалось со временем, найденным на опыте. И вот оказалось, что если промежуток времени больше, чем нужный для полного разряда, то конденсатор не только разряжается, но и перезаряжается. Подробное исследование этого явления привело бы, вероятно, Столетова к ряду дальнейших открытий и заключений. Но та-

¹⁾ Одним из побочных результатов этих опытов явилось определение контактных разностей потенциалов различных металлических пар. Этот новый метод, новизна которого заключалась в применении гальванометра, дал хорошее совпадение с данными обычных определений.

кого исследования им произведено не было. Он только высказал свое убеждение в том, что заряджение положительным электричеством есть не что иное, как разряджение отрицательным, что совершенно точно соответствует действительности.

В заключение нам кажется интересным привести резюме результатов фотоэлектрических исследований Столетова, составленное им самим. Оно касается всех работ, за исключением последней, где сообщалось об опытах, произведенных в различных газах и парах при различных давлениях. Вот оно:

1. Лучи вольтовой дуги, падая на поверхность отрицательно заряженного тела, уносят с него заряд. Смотря по тому, пополняется ли заряд и насколько быстро, это удаление заряда может сопровождаться или нет заметным падением потенциала.

2. Это действие лучей есть строго униполярное: положительный заряд лучами не уносится.

3. По всей вероятности, кажущееся заряджение нейтральных тел лучами объясняется тою же причиной.

4. Разряжающим действием обладают — если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими — лучи самой высокой преломляемости, недостающие в солнечном спектре ($\lambda 295 \cdot 10^{-6}$ мм). Чем спектр обильнее такими лучами, тем сильнее действие.

5. Для разряда лучами необходимо, чтобы лучи поглощались поверхностью тела. Чем больше поглощение активных лучей, тем поверхность чувствительнее к их разряжающему действию.

6. Такой чувствительностью, без значительных различий, обладают все металлы, но особенно высока она у некоторых красящих веществ (анилиновых красок). Вода, хорошо пропускающая активные лучи, лишена чувствительности.

7. Разряжающее действие лучей обнаруживается даже при весьма кратковременном освещении, причем между моментом освещения и моментом соответствующего разряда не протекает заметного времени.

8. Разряжающее действие, *ceteris paribus*, пропорционально энергии активных лучей, падающих на разряжаемую поверхность.

9. Действие обнаруживается даже при ничтожных отрицательных плотностях заряда; величина его зависит от этой плотности; с возрастанием плотности до некоторого предела оно растет быстрее, чем плотность, а потом медленнее и медленнее.

10. Две пластинки разнородных по ряду Вольта металлов, помещенные в воздухе, представляют род гальванического элемента, как скоро электроотрицательная пластинка освещена активными лучами.

11. Каков бы ни был механизм актино-электрического разряда, мы вправе рассматривать его как некоторый ток элект-

ричества, причем воздух (сам по себе или благодаря присутствию в нем посторонних частиц) играет роль дурного проводника. Кажущееся сопротивление этому току не подчиняется закону Ома, но в определенных условиях имеет определенную величину.

12. Актино-электрическое действие усиливается с повышением температуры.

IV. Результаты исследований Столетова опубликованы им в шести статьях, а именно:

1. Compt. Rend. CVI, 1149, 1888.
2. " " CVI, 1593, 1888.
3. " " CVII, 91, 1888.
4. " " CVIII, 1241, 1889.
5. ЖРФХО, 21, 159, 1889.
6. Journal de Physique, 9, 468, 1890.

Кроме того, в 1889 г. им был написан первый в литературе данной области обзор по фотоэффекту, изданный Физико-химическим обществом при Петербургском университете в том же 1889 г. Этот обзор в основном построен на его собственных работах; результаты других авторов приводятся преимущественно для сравнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Hallwachs, Handb. de Radiologie, B. II, 1916.
 2. A. Stoletow, Journ. de Phys., 9, 468, 1890.
 3. A. Righi, Rend. Linc. (4), 6, 151, 1890.
 4. Г. Симон и Р. Зурман, Фотоэлементы и их применение, ОНТИ—ГТТИ, 1936.
 5. R. Pohl, Cött. Nachr. Math.—Phys. Kl., 185, 1926.
 6. G. M. Dobson, Proc. Roy. Soc. (A), 104, 248, 1923.
 7. Kteusler, Ann. Phusik, 6, 398, 1901.
 8. A. Stoletow, C. R., CVI, 1149, 1888.
 9. A. Stoletow, C. R., CVI, 1593, 1888.
 10. E. Widemann u. H. Ebert, Wied. Ann., 33, 248, 1888.
 11. W. Haliwachs, Wied. Ann., 33, 304, 1888.
 12. A. Righi, C. R., CVI, 1349, 1888.
 13. A. Righi, C. R., CVII, 559, 1889.
 14. A. Righi, N. Cimento, XXV, 15, 1889.
 15. Hoop, Sitzungsber. Wiener Akad., XCVII Abt. IIa, стр. 719, 1888.
 16. О. Д. Хвольсон, Курс физики, т. V, стр. 739, ГИЗ, 1923.
 17. О. Д. Хвольсон, Курс физики, т. V, стр. 711, ГИЗ, 1923.
-