

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ИСТОРИИ ВНЕШНЕГО
ФОТОЭФФЕКТА И ЗНАЧЕНИЕ РАБОТ СТОЛЕТОВА

(К шестидесятилетию со дня смерти А. Г. Столетова)

П. Г. Борзяк

ПРЕДИСЛОВИЕ

В нашем советском обществе большой популярностью пользуется имя А. Г. Столетова, выдающегося учёного и прогрессивного общественного деятеля своего времени. Мировую известность Столетову-учёному принесли, в частности, его исследования по внешнему фотоэлектрическому эффекту. Однако с тёх пор прошло более шести десятков лет, и далеко не всем приходилось читать как работы самого Столетова, так и его современников. Правда, в нашей современной литературе имеются изложения⁴⁹ основных результатов фотоэлектрических исследований Столетова, но там отсутствует сопоставление этих результатов с тем, что было сделано другими авторами того периода, что также необходимо для составления объективного представления о роли Столетова. Между тем в распространённой физической литературе приходится встречаться с весьма противоречивыми суждениями по последнему вопросу.

Часто в иностранной монографической литературе, в том числе переведенной на русский язык и находящейся поныне в широком ходу⁵⁰, обнаруживается вопиющее пренебрежение вкладом Столетова в данную область науки. Высказывается мнение, что в области внешнего фотоэффекта наряду с открытием Герца сделаны якобы не менее, а то и более важные и принципиальные открытия Гальваксом, что даёт основание даже само интересующее нас явление называть эффектом Гальвакса. Отсутствие наряду с этим иногда даже упоминания о Столетове должно приводить к выводу о его якобы второстепенной роли. Наоборот, некоторые наци авторы⁵¹ не только отводят Столетову первое место, но и приписывают ему

само открытие фотоэффекта. Инженеры, поверив этим учёным, распространяют последнюю версию в технической и научно-популярной литературе. Эти обстоятельства должны ставить в тупик нашуучающуюся и научную молодёжь. Очевидно, назрела необходимость изложить основные результаты Столетова на фоне краткого обзора работ начального периода истории внешнего фотоэффекта, чтобы читатель мог судить о роли Столетова не на основании только доверия к утверждениям того или другого автора, а на основании критического сопоставления фактического материала. При этом вследствие того, что авторы, выдвигающие имя Гальвакса на первое место, имеют в виду его первые две работы, на их разборе следует остановиться особенно подробно. Созданию общего представления о состоянии вопроса в тот период должен способствовать и приведённый в конце списка литературы по внешнему фотоэффекту, составленный, по возможности, в хронологическом порядке, за 1887—1890 гг., т. е. начиная со времени открытия явления и кончая последним годом деятельности в этой области А. Г. Столетова.

Всё это тем более уместно сделать в связи с тем, что мы находимся накануне шестидесятилетия со времени смерти Столетова.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые явление внешнего фотоэффекта наблюдал в Париже в 1885 г. ученик французского академика Маскара Нодон. В его опытах металлическая пластинка, соединённая с электрометром и помещённая в металлический ящик, подвергалась действию прямого солнечного света через маленькоекошко в ящике. При этом электрометр показывал зарядение пластинки электричеством положительного знака. Однако то ли за невозможностью понять наблюдаемое, то ли из-за неуверенности в правильности опытов, приводящих к столь удивительному явлению, автор и его учитель не решились на их публикацию. От Нодона Парижской академией наук было получено письмо в запечатанном конверте, зарегистрированное 29 июня 1885 г. Содержание этого письма с описанием вышеупомянутых опытов стало известным только 5 августа 1889 г., когда оно, по желанию автора, было вскрыто на заседании академии во время публичного сообщения о результатах его наблюдений над влиянием на явление метеорологических факторов³⁴. Но к этому времени уже было опубликовано около трёх десятков статей, посвящённых исследованию внешнего фотоэффекта. Поэтому то ли большая осторожность, то ли неуверенность, а также недостаточная оперативность и отсутствие надлежащей инициативы в развитии исследования стоили автору потери приоритета в открытии оказавшегося впоследствии столь важным явления. Эта часть оказалась заслужено принадлежащей известному немецкому физику Герцу, работой которого¹ и было положено начало широкому изучению внешнего фотоэффекта.

Однако сам Герц, натолкнувшись на явление в связи с исследованиями электромагнитных колебаний и вибраторов, приведшим в скором времени к открытию электромагнитных волн, после публикации своей статьи¹ никогда больше не занимался дальнейшим изучением фотоэффекта. Этим занялись другие авторы, в результате чего было заложено начало нового раздела физической науки с его замечательными практическими выходами. Среди этих авторов первого периода истории внешнего фотоэффекта наибольшие заслуги принадлежат нашему соотечественнику А. Г. Столетову.

В мае 1887 г. была послана в печать статья Герца, а в феврале 1888 г. начал свою работу Столетов. В том же году, начиная с апреля, появляются одна за другой три его публикации^{5, 13, 14}. В 1889 г. Столетов написал большую сводную статью, включающую и новые материалы, для ЖРФХО³⁵ и одно сообщение в Доклады Парижской академии наук²⁶. 17 июня 1890 г. была сдана в печать последняя из этого цикла работа⁴⁴. Таким образом, вся работа длилась около двух лет, и приходится удивляться, как много было сделано за такой короткий период одним человеком, занятым в основном преподавательской деятельностью. При этом поражают не количество и объём его публикаций, а то большое количество утверждившихся принципиальных результатов, которое содержится в сравнительно небольшом числе его статей.

1. ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА ИСКРОВОЙ РАЗРЯД

Герц¹ обнаружил, что искровое прохождение тока в одном разряднике облегчает прохождение тока в другом, соседнем. Исследуя это действие, Герц с помощью тщательных многочисленных опытов выяснил, что носитель этого действия распространяется и отражается по законам распространения и отражения света. Его проникновение через различные среды и преломляемость в различных средах оказались такими же, как и ультрафиолетовых лучей. Ряд других опытов также приводил к выводу именно о световом действии искры на другой искровой промежуток. При этом была установлена унипольлярность этого действия — освещение катода вызывало значительный эффект, анода — незначительный. Герц не мог исключить попадания на катод отражённого и рассеянного анодом света, почему он и признавал, что с надёжностью он не установил, связано ли воздействие света исключительно или только преимущественно с катодом.

Таким образом, путём многочисленных, целесообразно поставленных и кропотливых опытов Герц выяснил основные условия возникновения явления — оно вызывается действием ультрафиолетового света на катод (по крайней мере преимущественно). Вывод о действии именно ультрафиолетового света был проверен и подтверждён путём замены, вызывающей явление искры разного рода другими, богатыми ультрафиолетовыми лучами, источниками света, среди которых

особенно эффективным оказалась электрическая дуга. С нею были повторены все предыдущие опыты по изучению распространения, отражения, преломления действующего агента и поглощения его в различных средах, приводящие также однозначно к идентификации его с ультрафиолетовым светом. После этого электрическая дуга, как наиболее удобный в то время источник коротковолнового света, получила широкое применение и в опытах последующих авторов.

Герц признавал, что с методической стороны условия его эксперимента являлись усложнёнными, и указывал на необходимость, для дальнейшего изучения явления, их упрощения, устранив из опытов в первую очередь индукторы.

Видеман и Эберт² продолжили опыты Герца, усовершенствовав технику эксперимента. Герц о действии света судил по увеличению расстояния между электродами, при котором ещё наблюдалось прохождение искрового тока при заданном напряжении. Упомянутые авторы, проверив методику Герца, перешли к новой и в оригинальных опытах о действии света судили по изменению при заданном напряжении частоты искровых разрядов. Питая усовершенствованный разрядник от электростатической машины и включив в его цепь телефон, они прослушивали получавшийся в нём звук. При освещении катода звук приобретал характер музыкального тона и, кроме того, высота воспроизведенного телефоном тона повышалась по сравнению с тонами, прослушивавшимися в темноте. Это свидетельствовало об увеличении частоты разрядов. Это же было подтверждено и опытами с вращающимся зеркалом, дававшим временную развертку процессов прохождения искровых разрядов.

Устранив попадание на катод отражённого и рассеянного света, авторы уточнили результат Герца, чётко показав, что освещение анода не вызывает никакого эффекта и явление возникает только при освещении катода. Авторы представляли себе, что действие света способствует возникновению катодных лучей, правильного понимания природы которых, конечно, в то время ещё не было. В некоторых случаях авторы обнаружили действие не только ультрафиолетового, но и крайне коротковолнового видимого света.

Не останавливаясь на других результатах этой работы, перейдём к более подробному изложению исследований Гальвакса.

2. ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА ЗАРЯЖЕННЫЙ ПРОВОДНИК

Следуя указаниям Герца, Гальвакс уже в первой своей работе³ действительно существенно упростил опыт и сделал его весьма наглядным, перейдя от искровых к тихим разрядам. Он с помощью электроскопа наблюдал за изменением потенциала однократно заряженного металлического диска, расположенного перед заземлённой металлической щирмой с отверстием для пропускания света к диску. Под влиянием освещения светом электрической дуги отрицательно

заряженный диск быстро разряжался. Описание постановки опыта и составляет содержание § 1 его статьи. Заглавия последующих параграфов формулируют полученные результаты. Поэтому мы их и воспроизведём.

«§ 2. Действие электрической дуги происходит преимущественно от ультрафиолетового света».

Это было установлено путём повторения таких же опытов, которые были проведены Герцем.

«§ 3. Явление обусловлено действием ультрафиолетового света на поверхность заряженного тела».

Здесь доказывалось, что явление происходит не от воздействия света, скажем, на окружающий проводник газ, а именно от воздействия на сам проводник. Это вытекало из того, что свет, проходящий в непосредственной близости вдоль поверхности плоского электрода, никакого разряжающего действия на отрицательный электрод не оказывал. К такому же результату, мы видели, пришли уже предыдущие авторы на основании «зондирования» световым пучком искрового промежутка. Явление учащения разрядов наступало, как только свет задевал поверхность катода.

«§ 4. Переход электричества».

Описанный здесь опыт являлся продолжением первого. В первом опыте наблюдался уход заряда с отрицательно заряженного проводника. Здесь было показано, что уходящий заряд не исчезает бесследно, а переходит на окружающие тела, что и можно обнаружить с помощью электроскопов. Для опыта брались две металлические, пластинки, соединённые с электроскопами. Первой пластинке сообщался отрицательный заряд, вторая находилась при потенциале земли будучи изолированной. Пластинки устанавливались под некоторым углом так, чтобы их обращённые друг к другу поверхности можно было освещать спереди. При освещении листочки электроскопа, соединённого с отрицательно заряженной пластиной, спадали, а листочки второго — расходились. Ясно было видно, что заряд уходил с первой пластины и появлялся на второй.

Этим исчерпывается фактическое содержание первой работы Гальвакса. Её результат сформулирован в одной из последующих статей автора²⁵ следующим образом: «... некоторое время тому назад я показал, что при освещении соответствующим ультрафиолетовым светом отрицательно заряженной чистой металлической пластины отрицательное электричество рассеивается, следуя электростатическим силам поля». Правда, последнее непосредственно не было показано. Вопросу о путях движения зарядов между электродами были потом посвящены специальные исследования Риги^{12, 15, 45, 48}. К заключительному § 5 работы Гальвакса, где уже фактического материала не содержится, мы вернёмся позже.

Таким образом, Гальвакс повторил результаты предыдущих авторов, но с другой методикой. Различие заключалось в том, что

Гальвакс наблюдал «разряжающее действие» света на проводник, однократно заряженный, скажем, с помощью эbonитовой палочки, а, например, Видеман и Эберт — на проводник, непрерывно подзаряжаемый электростатической машиной. Различие заключалось в переходе Гальвакса от искровых разрядов к тихим. Это упростило опыт и сделало его очень популярным, распространённым демонстрационным опытом, но ничего принципиально нового в научном отношении в этом, по существу, не содержалось. Хотя надо полагать, простота и убедительность этого опыта Гальвакса способствовали привлечению внимания к фотоэлектрическим явлениям.

Можно подумать, что мы, может быть, теперь не в состоянии объективно оценить положение в то отдалённое от нас время. Но если мы обратимся к современникам, то встретимся с таким же пониманием дела. Сам Столетов^{5, 35} писал о повторении им опытов Герца, Видемана и Эберта, Гальвакса. Результаты последнего в его понимании ничем с принципиальной стороны не выделялись по сравнению с предшествующими. В одном из совершенно беспристрастных рефератов⁵¹ статьи Гальвакса читаем: «Влияние света на электрическое разряжение было исследовано в последнее время многими физиками, так что можно надеяться, что в скором времени будет дано полное объяснение этого интересного явления. Непосредственно после сообщения Герца автор (т. е. Гальвакс) исследовал это явление, упростив по возможности опыт». И дальше следует изложение содержания работы. Здесь мы не встречаем и намёка на то, чтобы обнаружить открытие чего-то принципиально нового в реферируемой работе. Наконец, и немецкие авторы²², из которых один — Ленард — являлся виднейшим физиком, открывшим впоследствии фотоэлектрон, в вводной части своей статьи писали: «Открытие Герцем действия ультрафиолетового света на величину разрядного искрового промежутка обусловило ряд исследований, в которых это действие было изучено ближе. Оказалось, что свет действует не на газ между электродами и не на анод, а только на катод (Е. Видеман и Эберт); что, следовательно, он вызывает переход отрицательного электричества в воздух... Обнаружено, что под действием ультрафиолетового света также отрицательное электричество и более низкого напряжения разряжается в воздух (Гальвакс) и переходит на окружающие проводники. Так что из двух разделённых воздухом металлов, из которых один освещается, можно составить «фотоэлемент» (Столетов)». Исследование Гальвакса и здесь рассматривается в одном ряду, начатом Герцем.

Иначе относился к этому сам Гальвакс. Во вступительной части своей первой статьи³ он писал не о продолжении исследований Герца и не об исследовании открытого Герцем явления, а о том, что он «исследовал родственное явление, протекающее при более простых условиях». В § 2 этой статьи написано о «связи нашего явления» с явлением Герца. Но, может быть, это — результат времен-

ного недоразумения? Обратимся к его подробнейшему обзору по внешнему фотоэффекту, написанному уже в 1913 и изданному в 1916 г.⁵² Описавши свой первый опыт, на стр. 249 он претенциозно (но, как увидим, не основательно) заявляет: «Это явление доставило искомое действие простого вида, которое в этой новой области давало средство с помощью простых измерений проникнуть во всё протекание процесса, почему оно и послужило основой для очень большого числа работ (сравни § 1)». А в § 1 говорится о всём объёме работ по фотоэлектронной эмиссии до 1914 г. Таким образом, автор недвусмысленно приписывает себе роль основоположника исследований по внешнему фотоэффекту. Поэтому на стр. 263 опять читаем о «явлении Герца» и «явлении, открытом автором». При этом используется и скромность самого Герца. Во 2-й сноске на стр. 251 читаем: «Относительно сопоставления упомянутых здесь работ Герца и автора следует сослаться на труд Герца (Исследования над распространением электрической силы, Leipzig, Barth, 1892, S. 289, Nachtrag 11), где он упоминает, что ему не удалось найти такие условия, при которых бы так мало понятное явление искрового разряда было заменено более простым действием, и продолжает: «Это только господину Гальваксу удалось, Wied. Ann., 33, p. 301, 1888». Господин Варбург потом (Berl. Ber., 1896, S. 229), впервые применил название эффект Гальвакса, в чём ему следуют многие авторы до настоящего времени». И в оправдание этого он на стр. 281—283 отводит целый параграф доказательству того, что «Исследования явления Герца показывают, что действие света на искровой разряд в меньшей степени относится к собственно фотоэлектрической области, а скорее к области механики искрового разряда. Из этого ясно также, почему попытки проникнуть в фотоэлектрическую область при помощи действия света на искрообразование не дали настоящих результатов...». Всё это, конечно, не может считаться серьёзным. В том и заключается заслуга Герца, что он среди этой сложной механики искрообразования сумел подметить и потом исследовать новое явление. Но, кроме того, мы увидим, что и сама работа Гальвакса никак не приблизила нас к проникновению в сущность явления.

В противоположность всему этому Столетов, сделавший несравненный вклад в данную область, называл Герца «тем самым исследователем, которому принадлежит и первое открытие фактов, названных мной «актино-электрическими»³⁵, стр. 205). (Для пояснения названия «актино-электрические» во втором своём сообщении¹³ Столетов сделал сноsku: «Я употребляю это выражение для обозначения электрических явлений, вызываемых излучениями».)

Но, может быть, не так сами эксперименты и их результаты, как интерпретация последних дают право Гальваксу на приоритет? Приведём полностью заключительный § 5 его работы³:

«Так как наше явление обусловлено процессом на поверхности пластин и действие на положительное и отрицательное электричество различно, мне кажется, что для объяснения этого наиболее вероятным пока является предположение, что, может быть, на поверхности происходит каким-то образом разделение электричеств. Предпринятые в этом направлении исследования хотя и дают результат, подтверждающий это предположение, всё же их число ещё мало и условия опыта ещё недостаточно варьированы, чтобы делать окончательные выводы. Поэтому их опубликование я задерживаю».

Следует отметить, что за словами «разделение электричеств» не содержалось какого-то конкретного понятия о механизме явления, связанном со структурой вещества. К этому времени не были открыты ещё ни электроны, ни, тем более, строение атома. Поэтому неясно было, почему разделение электричеств приводит к уходу отрицательного заряда с находящегося при отрицательном потенциале и освещаемого электрода, а с положительным электричеством аналогичного явления не происходит. Правда, сам Гальвакс в первой же своей статье писал, что при более точных исследованиях якобы можно заметить действие света и на положительно заряженный металл. Может быть, эта ошибка и дала ему вначале повод говорить о «разделении электричеств». Но во всяком случае, как видим, по поводу нового явления автор высказывается очень нерешительно и не очень внятно. Столетов называет это «неопределённо высказанными замечаниями» (35, сноска ¹) на стр. 200). Но Гальвакс обещает дополнительно опубликовать относящиеся к этому вопросу результаты опытов. Поэтому нам придётся, отступив уже от хронологической последовательности изложения, обратиться к следующей его работе, в которой описан его второй основной опыт.

3. ЗАРЯЖЕНИЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ ОСВЕЩЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВОДНИКА

В последующих исследованиях Гальвакса ¹¹ цинковая пластина, соединённая с электрометром, подвешивалась на изоляторе внутри железной коробки и освещалась через окно, пропускающее ультрафиолетовый свет. Перед началом опыта пластина отводилась к земле. Чтобы при этом на ней не наводился отрицательный заряд, материал коробки был выбран так, чтобы его контактный потенциал по отношению к пластинке был отрицателен. После отключения пластины от земли и следующего за этим освещения светом магниевой лампы наблюдалось её заряжение до небольшого положительного потенциала. Таким образом было установлено, что под действием ультрафиолетового света происходит не только потеря отрицательного заряда отрицательно заряженными проводниками, но и некоторое положительное заряжение незаряженных провод-

ников. Переход к такому опыту являлся логическим продолжением линии перехода от высоких потенциалов к низким; к экспериментальному заключению о действии света и на незаряженные проводники независимыми путями, кроме Гальвакса, пришло ещё несколько исследователей. Среди них в первую очередь следует упомянуть Риги.

Первая работа Риги⁴ появилась вслед за первой работой Гальвакса. Как писал автор, он в поисках объяснения явлений, описанных Герцем, Видеманом и Эбертом, Гальваксом, задался целью изучить влияние света на контактно-электрические явления между металлами. Для этого он брал два металла: один в виде сплошного диска, другой — в виде сетки, параллельно и близко друг к другу расположенных. Соединяя сплошной диск с одной парой квадрантов электрометра, а сетку — с другой парой квадрантов и землём, он при освещении этой системы светом электрической дуги сквозь сетку наблюдал отклонение электрометра. Такую систему из металлической сетки и подверженного освещению диска Риги впервые назвал «фотоэлементом». Он также составил батарею из четырёх таких последовательно соединённых фотоэлементов, но не догадался отбирать от неё, как и от отдельного элемента, ток, а ограничился электростатическими наблюдениями. «Такого рода фотоэлектрическая батарея, — писал автор в цитируемой работе, — показывает хорошо известные электростатические явления, получающиеся в батарее с разомкнутой цепью...» (См. также¹⁸, С. Р., 2°). Автор полагал, что ультрафиолетовое освещение уравнивает потенциалы соседних металлических тел и потому отклонение электрометра является мерой контактной разницы потенциалов данных металлов. Для опытов, поставленных в чистых условиях, такое заключение, мы знаем, является неверным.

Убирая сетку и оставляя одну пластинку, соединённую с электрометром, Риги также наблюдал её положительное зарядение при освещении ультрафиолетовым светом. По этому поводу он писал: «повидимому, в таком случае тела, окружающие пластинку, заменяют металлическую сетку; поэтому, вероятно, отрицательное электричество переходит на эти тела и оттуда на землю». Это и был первый опыт с наблюдением фотоэлектрического положительного заряжения металлического тела, незаряженного извне отрицательно. Однако в данной работе ещё предполагалось, что под влиянием окружающих тел на исследуемой пластинке наводится отрицательный заряд и в конечном счёте свет действует на отрицательно заряженный проводник. Но затем Риги проделал и эксперимент, очень похожий на опыт Гальвакса. В медную коробку вводилась на изоляторе медная же пластинка, соединённая с электрометром. Для большей уверенности в отсутствии наведенного отрицательного заряда на пластинке она немножко подзаряжалась положительно. При освещении её ультрафиолетовым светом она заряжалась до

большего положительного потенциала. Этот опыт был проделан независимо от второго опыта Гальвакса, хотя публикация последнего появилась раньше. В связи с появлением сводной статьи Риги¹⁸ Гальвакс в идентичных письмах в редакции двух журналов⁴¹ выступил в защиту своего приоритета в открытии «фотоэлектрического возбуждения». В ответном письме Риги⁴² писал: «Как засвидетельствовал г. Гальвакс, я впервые установил факт, что освещаемый проводник приобретает положительный потенциал. Правильное выяснение этого обстоятельства было впервые дано им 5 мая 1888 года в сообщении в Геттингенской Академии и после этого мною в сообщении от 1 июля 1888 г. в Линчейской Академии. В то время мне ничего не было известно о его публикации и о том, что он меня опередил, я впервые узнал из 8 тетради Wied. Ann. 1888 г. и июльского номера за 1888 г. Phil. Mag. Я поспешил привести цитату из его работы при просмотре корректуры моей заметки от 1 июля...».

Надо полагать, конечно, что и большинство немецких физиков узнало о второй работе Гальвакса из тех же источников, что и Риги. Поэтому опубликованные в самом начале июля опыты Биша и Блондло¹⁶, без ссылки на Гальвакса, также следует считать независимыми. Авторы для своих опытов брали тщательно очищенные металлические пластинку и сетку, которые они для исключения влияния контактной разности потенциалов вырезали из одного и того же листа латуни. При освещении ультрафиолетовым светом пластиинка, писали авторы, «приобретает положительный заряд, т. е. теряет отрицательное электричество». Более того, когда на сетку было подано отрицательное напряжение в два вольта и применена принудительная конвекция воздуха (обдувание) для увода зарядов от освещаемой пластинки, то и тогда наблюдалось как положительное её заряжение, так и соответственного направления фототок (ранее открытый Столетовым). Авторы заключили, «что все описанные здесь факты могут быть объяснены при допущении, что комбинированное влияние света и обдувания действует не только на явный заряд поверхности пластиинки, обязанной своим происхождением предварительной электризации, но также и на находящуюся в воздухе половину двойного слоя, обуславливающего скачок потенциала между воздухом и металлом. Достаточно предположить, что металл положителен относительно воздуха».

И, наконец, к установлению того же факта на основании иной, оригинальной методики пришёл и Столетов. Продолжая свои начальные исследования влияния контактных потенциалов на фотоэлектрические токи⁵, он проделал опыты³⁵ по схеме, показанной на рис. 1. При освещении в течение некоторого времени металлического диска D происходило заряжение обкладок конденсатора K до некоторого потенциала, зависящего от времени освещения. При замыкании обкладок конденсатора через гальванометр T наблюдался

отброс, величина которого служила мерой заряжения конденсатора. При освещении достаточной длительности наблюдался отброс гальванометра, соответствовавший разности потенциалов на обкладках конденсатора, большей, чем контактная разность между *D* и *C*. «Приходится допустить, — писал Столетов, — что исподволь сплошной диск не только освободился от отрицательного заряда (уравнял свой потенциал с сеткой), но и зарядился положительно... Остается заключить, что самое действие лучей заряжает проводник положительным электричеством. То же обнаруживается и на арматурах однородных (напр. *Ag* и *Ag*).

Это заряжение лучами мною подробнее не исследовалось, хотя некоторые опыты такого рода я повторил с квадрант-электрометром. Оно было предметом опытов Гальвакса, опубликованных ранее, чем я выяснил себе дело, а потом опытов Биша и Блондло, а также Риги⁽³⁵⁾, стр. 200).

Таким образом, к установлению одного и того же факта независимыми путями, кроме Гальвакса, пришли ещё три автора. Но юридически приоритет остался за Гальваксом, как ранее всех опубликовавшим свой результат. Но теперь возникает вопрос, чьи выводы из найденного факта являются более правильно ориентирующими последующих исследователей в данном вопросе. Заключение Биша и Блондло мы приводили. Риги пришёл к ошибочному убеждению, «что производимый освещением положительный заряд ограничивается плотностью электричества, приобретённого пластинкой; как только эта плотность достигает определённого значения, постоянного для данного металла, действие приостанавливается». (Цитируется по С. Р.¹⁸, *i.*)

В то время как, например, Биша и Блондло не усматривали различия между явлениями разряжения отрицательно наэлектризованных тел и положительного заряжения ненаэлектризованных, совершенно иной подход к этому вопросу находим у Гальвакса. В описании его опытов¹¹ читаем следующее:

«Коробка была сделана из ржавого железа с тем, чтобы её контактный потенциал относительно пластинки был отрицателен. Только в таком случае можно однозначно объяснить показываемое электрометром возрастание потенциала. Ибо, если бы пластинка была отрицательной относительно коробки, то повышение потенциала происходило бы также вследствие удаления освещением отрицательного электричества. Если же пластинка была положительной относительно целиком её охватывающей коробки и имела вследствие этого положительный заряд, то повышение потенциала могло быть объяснено только тем, что освещением на пластинке возбуждается положительное электричество».

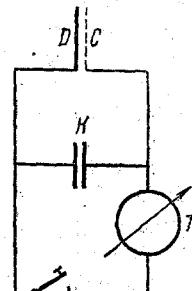


Рис. 1.

Здесь Гальвакс говорит как будто о новом явлении возбуждения положительного электричества, причём не за счёт ухода отрицательного. Нужно сказать, что из этого не создаётся более ясного понимания явления, чем и из заключительного абзаца первой статьи Гальвакса. Введение им нового термина для обозначения якобы ново наблюдаемого явления «фотоэлектрическое возбуждение» ничем не способствовало внесению ясности в вопрос. Что её не было и у самого Гальвакса, мы уже только что видели. Это видно опять-таки из заключительного абзаца и его второй статьи:

«Потому что описанные здесь исследования должны были прерваться, я позволил себе пока сообщить главнейшие результаты; находится ли вызываемое освещением электрическим светом электрическое возбуждение в прямой связи с потерей электричества электрически заряженным телом при его освещении, об этом я ещё ничего не могу сказать, так как мне до сих пор не представилась возможность поставить опыты в этом направлении»¹¹.

Таким образом, в первых двух и вместе с тем основных работах Гальвакса высказано два определённых утверждения: 1) о потере под влиянием освещения заряда отрицательно заряженными телами, что не являлось оригинальным, и 2) о возбуждении светом на металлическом теле положительного электричества, причём не за счёт ухода отрицательного, что являлось неясным и, как нам теперь известно, неверным. Правда, из сказанного Гальваксом во второй статье оставалось неясным, являлся ли описанный в ней опыт обещанным в первой работе, но не оправдавшим возлагавшихся на него надежд, или же это опыт иной, результаты которого неизвестно как согласовать с первым. Но известно, что никакой третьей работы для выяснения поставленного вопроса Гальваксом не было выполнено. Сам же он впоследствии считал цитируемую здесь работу наибольшей своей заслугой именно благодаря открытию, как видим, непонятного «фотоэлектрического возбуждения».

Мнение Столетова по поводу обнаруженного явления заряжения выражено следующим образом: «Думаю, что здесь мы имеем дело не с особым новым фактом,— что это актино-электрическое заряжение положительным электричеством — следует объяснять себе как результат актино-электрического разряжения отрицательно заряженных тел; на это намекают и названные французские авторы». (Речь идёт о Биша и Блондо¹², стр. 200.) Далее тут же в итогах основных исследований Столетова читаем:

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

В этом пункте обобщаются результаты наблюдений с помощью различных методик: Герца, Видемана и Эберта, Гальвакса, Столетова.

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

3. По всей вероятности, кажущееся заряжение нейтральных тел лучами объясняется той же причиной».

Возвращаясь к этому вопросу в заключительном § 18 своей статьи³⁵, Столетов писал: «В предыдущем я говорил о разряже-
ни и тел лучами; но есть опыты, доказывающие, что лучи заря-
жают нейтральное тело. Мне кажется, первый из этих фактов
следует признать фундаментальным, второй же объяснять как след-
ствие первого... Можно развить мысль, кратко и недостаточно
высказанную у Биша и Блондло, и объяснить себе до некоторой
степени как процесс разряжения отрицательно наэлектризованных
металлов, так и процесс заряжения нейтральных или положитель-
ных — если только примем как факт, что известного рода лучи
стремятся уносить отрицательные заряды».

Эти высказывания действительно, как нам теперь ясно, могли давать правильную ориентацию в исследовании нового явления. Но они ещё более подчёркивают очевидность того, что если первая работа Гальвакса не давала никаких оснований для приписывания ему открытия явления, то высказывания по поводу обнаруженного факта во второй работе отнюдь не могут претендовать на какие-то направляющие установки в дальнейшем развитии данного вопроса. Наоборот, они могли скорее дезориентировать последователей. Последнее можно аргументировать и некоторыми дальнейшими исследованиями самого Гальвакса.

Под влиянием работы Биша и Блондло¹⁶ по наблюдению комбинированного действия света и обдувания на металлическую пластинку Гальвакс с некоторым видоизменением повторил их опыты и уже в 1890 г. опубликовал статью «Лекционная демонстрация фотоэлектрического возбуждения»⁴⁰. В этой статье он писал: «Г. г. Биша и Блондло нашли потом способ усиливать возбуждение тем, что на освещаемую пластинку они направляли также поток воздуха, причём получили повышение потенциала до 30 вольт. Этот метод усиления возбуждения вместе с тем выдвигает взгляд на связь между фото-электрическим возбуждением и фотоэлектрическим разряжением, сводящийся к тому, что разряжение следует рассматривать как следствие возбуждения, согласно которому последнее (возбуждение) может быть усилено электростатическими силами сообщаемых пла-
стине отрицательных зарядов так же, как и потоком воздуха. Эта связь сделала понятными опыты Риги, который доказал пропорциональность между создаваемым освещением, потенциалом и проявляющейся на поверхности электростатической силой».

Но здесь Риги в своём письме⁴², имея, вероятно, в виду свои работы^{15, 18, 21}, уличил Гальвакса в ошибочной передаче его выводов: «Что я доказал — это как раз независимость достижимых потенциалов от электростатической силы на поверхности.

В действительности я нашёл, что у проводника определённой природы (в воздухе при определённых условиях температуры и давления, освещённого действующими лучами данной интенсивности) возбуждаемый на нём освещением заряд перестаёт расти, когда электрическая плотность на его поверхности (и, следовательно, также электростатическая сила) достигает определённого постоянного значения, тогда как потенциал, к которому в то же время приводится проводник, может достигнуть любого значения, в зависимости от формы, положения и т. д. проводника». (Кстати, это не согласуется с заключением Риги в первой его работе, где он доказывал, что свет уравнивает потенциалы проводников.)

Таким образом, Гальвакс пришёл к выводу, что первичное, по его мнению, явление может быть усилено действием поля или струёй воздуха, и рекомендовал даже демонстрационный опыт с заряжением проводника до 100 вольт⁴⁰. Риги же пришёл к выводу, что первичное явление заключается в сообщении поверхности проводника определённой плотности электрического заряда. С точки зрения того, что мы сейчас знаем о фотоэффекте, и то и другое является неверным. Гальвакс, гордившийся тем, что он нашёл якобы первичное явление, усложнил опыт применением обдувания, что привело к толкованию результатов, не помогающему проникнуть в природу истинного первичного явления, а уводящему от понимания этой природы. Из этого скорее следует не основоположность работ Гальвакса, а идейная несостоятельность его выводов.

4. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ФОТОЭЛЕМЕНТ С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ

Работы Гальвакса не могли быть основоположными ещё и по той причине, что его методика исследования не явилась плодотворной. Она была удобной для демонстрации явления, но не пригодной для проведения количественных измерений, для дальнейшего развития исследований. И действительно, оглядываясь теперь на пройденный путь, мы можем отметить, что она не только не дала средства «с помощью простых измерений проникнуть во всё протекание процесса», но в развитии области фотоэлектрических явлений она не сыграла заметной роли и жила преимущественно в школьных опытах. Даже данные по максимальным энергиям фотоэлектронов получались главным образом либо из вольтамперных характеристик фотоэлектронных токов, либо (значительно реже) из магнитного анализа.

Действительно широкой методической основой для развития исследований нового явления и всего дальнейшего прогресса в этой области явилась идея характеризовать новые явления с помощью результатов измерения фотоэлектрических токов, выдвинутая Столетовым^{5, 35}. Для своих исследований Столетов избрал систему электродов, состоящую из сплошного металлического диска и металличе-

ской сетки, т. е. точно такую же, какой пользовался и Риги. Однако оба автора пришли к этому совершенно независимо. Нужно помнить, что свою первую работу⁴ Риги доложил 4 марта, когда она и пошла в печать в мало распространённый орган (Rend. Linc.). Работа же Столетова⁵ докладывалась в Московском обществе любителей естествознания 23 марта. 25 марта она была направлена для доклада в Парижскую Академию наук академику Маскарю, который сделал сообщение о ней 16 апреля. Это же является датой поступления её в печать в «Доклады» этой Академии (см.¹³, сноска 4 на стр. 1593). Поэтому Столетов ко времени публикации своей работы ничего не мог знать о работе Риги, что последним также признавалось⁷.

Но хотя приборы Риги и Столетова одинаковы, методы их использования были разными, как это видно из рис. 2. Риги, как и Гальвакс, довольствовался электростатическими опытами, измеряя потенциалы и их изменения у исследуемых тел (рис. 2, а).

Столетов в цепь диска и сетки своего, как он называл, «сетчатого конденсатора» включил гальванометр и измерению подвергал оказавшийся наблюдаемым фотоэлектрический ток (рис. 2, б). Это обстоятельство явилось более важным, чем мог, естественно, предполагать и сам автор. Преимущество нового метода заключалось не просто в том, как пишут до сих пор, отпадала необходимость работать с высокими напряжениями и привлекались в качестве технических средств точные электроизмерительные приборы, позволявшие перейти от качественного к количественному изучению явления. Электрометр является не менее, а даже более точным прибором, чем гальванометр. Значение нового метода было более принципиальным и состояло в том, что получалась возможность непосредственного измерения количества эмиттируемых электронов; в том, что была выбрана для исследования характеристика, лучше отображающая сущность явления и вместе с тем лучше поддающаяся количественному измерению, будучи к тому же меньше подверженной и влиянию посторонних факторов. Именно это обеспечило возможность устанавливать закономерности явления ещё до раскрытия его природы, что, как нам теперь хорошо известно, не могло быть сделано раньше открытия фотоэлектрона и квантовой природы света. Такие экспериментально устанавливаемые количественные закономерности обычно и являются базой для построения правильной теории, вскрывающей природу явления. Этой цели, как известно,

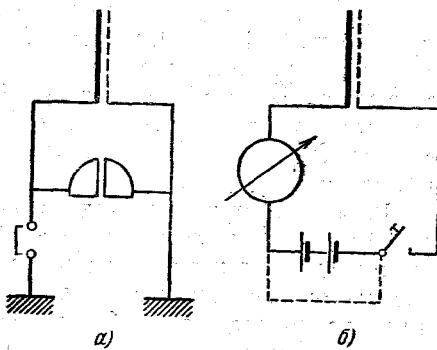


Рис. 2.

пор, отпадала необходимость работать с высокими напряжениями и привлекались в качестве технических средств точные электроизмерительные приборы, позволявшие перейти от качественного к количественному изучению явления. Электрометр является не менее, а даже более точным прибором, чем гальванометр. Значение нового метода было более принципиальным и состояло в том, что получалась возможность непосредственного измерения количества эмиттируемых электронов; в том, что была выбрана для исследования характеристика, лучше отображающая сущность явления и вместе с тем лучше поддающаяся количественному измерению, будучи к тому же меньше подверженной и влиянию посторонних факторов. Именно это обеспечило возможность устанавливать закономерности явления ещё до раскрытия его природы, что, как нам теперь хорошо известно, не могло быть сделано раньше открытия фотоэлектрона и квантовой природы света. Такие экспериментально устанавливаемые количественные закономерности обычно и являются базой для построения правильной теории, вскрывающей природу явления. Этой цели, как известно,

послужили и первый закон Столетова в области фотоэлектричества, равно как и другие его результаты, и явление Столетова в области газового разряда. К тому же схема измерений согласно рис. 2, б, а не рис. 2, а является и схемой использования фотоэлементов и в настоящее время. В самом деле, у фотоэлементов с внешним фотоэффектом всегда для применений используется фототок и никогда не используется создаваемая светом фото э. д. с.

Интересно отметить, что сообщение Столетова о наблюдении фотоэлектрических токов вызвало на следующем же заседании Парижской Академии замечания известного французского учёного, академика Эдм. Беккереля⁶. Последний писал: «Я хочу заметить по этому поводу, что эти явления мне кажутся аналогичными тем, которые я наблюдал и анализировал в 1853 г., но иным способом; к тому времени я показал, что нагретые газы могут проводить электрические токи, порождаемые парами с очень малой электродвижущей силой (de couples à très faible force électromotrice) и что эти явления зависят от природы газа, его плотности, а также относительных размеров электродов». Действительность показала несомненность этого замечания и Столетову не потребовалось даже специально на него отвечать, почему оно и осталось мало кому известным.

Во многих случаях исследователи и после Столетова продолжали ещё пользоваться электрометрическим методом, пока их собственный опыт не доказал невозможность получения количественных характеристик явления без метода Столетова. Так, например, известные немецкие исследователи Эльстер и Гайтель, долго пользовавшиеся исключительно электрометрической методикой, столкнувшись в 1892 г. с необходимостью количественного сравнения чувствительностей катодов из разных щелочных металлов в видимом свете⁵³, вынуждены были прибегнуть к методу Столетова. В следующем году, когда возник вопрос о спектральных чувствительностях фотокатодов, они писали: «После того, когда мы теперь, при изменении схемы опыта, заменили исключительно ранее нами применяемый электрометрический метод измерения гальванометрическим⁵⁴, нам представилось возможным произвести с некоторой точностью сравнение цветовой чувствительности щелочных металлов: натрия, калия, рубидия»⁵⁴. С тех пор вступила в силу монополия столетовского метода.

5. ПЕРВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ. ФОТОТОК НАСЫЩЕНИЯ

Отличительной чертой уже первой работы Столетова по сравнению с другими являлось выраженное в ней стремление к получению не только качественных, но и количественных результатов. Им было установлено, что при прочих равных условиях фототок пропорционален освещаемой поверхности катода. Это была первая количественная характеристика нового явления. Полученный результат указы-

вал, что каждый элемент поверхности катода участвует в создании фотоэлектрического тока независимо от других, в том числе соседних участков. При отсутствии понимания не только природы явления, но и самой природы электричества установление этого факта являлось очень важным.

В первой же работе Столетов установил количественное соотношение между фототоком, прикладываемым напряжением между электродами и расстоянием между ними, и изучил особенности вольт-амперной характеристики фототока в воздухе. Развитие этих исследований с применением более прецизионных методов как для случая атмосферного давления²⁶, так и при различных разрежениях^{14, 44} привело Столетова к очень важным результатам с последствиями, имеющими большое теоретическое и практическое значение. Столетов опытно установил¹⁴, что зависимость величины тока от давления газа в фотоэлементе является функцией с максимумом. Давление, соответствующее максимуму тока, он назвал критическим. Количественные измерения при различных расстояниях между электродами и различных полях привели его к установлению простой зависимости: отношение напряжённости поля к критическому давлению есть величина постоянная^{35, 44}. Это явление, названное впоследствии явлением Столетова, послужило одним из экспериментальных фундаментов для обоснования теории несамостоятельного газового разряда. Но в отношении фотоэлементов для нас существенно то, что в этих исследованиях при малых давлениях была установлена возможность путём изменения давления газа увеличить фототок в несколько (в 4—6 раз). Этим были заложены основы, о чём свидетельствует и Гальвакс (см.⁵², стр. 435), для газоразрядного усиления фотоэлектронных токов в фотоэлементах, что привело впоследствии к созданию газонаполненных фотоэлементов.

Эти же опыты привели сначала к установлению факта, что и при наибольшем достижимом разрежении воздуха фототок не следует до нуля вместе с разрежением¹⁴, а потом⁴⁴ и к важному открытию тока насыщения. Конечно, в то время, как нам теперь совершенно ясно, нельзя было понять смысла существования тока насыщения в фотоэлементах, но Столетов оценил значение этого факта для будущего выяснения физики явлений в фотоэлементах: «Закон (4) $\left(\frac{P_m I}{E} = \text{const.}\right)$, определяющий] критическое давление, повидимому, доказывает, что воздух принимает непосредственное участие в аэто-электрической конвекции; трудно представить себе, что такое простое соотношение могло бы осуществляться, если бы дело обстояло иначе. С другой стороны, существование определённого и конечного предела, к которому стремится ток по мере того, как P стремится к нулю, подсказывает предположение, что существуют другие причины, которые способствуют этой конвекции...». По этому поводу Гальвакс писал: «Столетов правильно осознал, что здесь речь

идёт о двух разных причинах: образование благоприятствующего давления заставляет делать вывод о газовом явлении, существование же при больших разрежениях граничного, независимого от потенциала, значения заставляет делать вывод о первичном действии, обусловленном другой причиной, скажем мы, — фотоэлектрической»⁵², стр. 273).

Важно здесь отметить, что внешне очень похожие на столетовские фотоэлектрические опыты в разреженных газах делал и Риги²³,⁴⁵. И вот здесь особенно ярко проявилась несостоительность электрометрической методики, которой всё время упорно пользовался Риги. В то время как Столетов при исследовании фототоков получил столь выдающиеся результаты, Риги при измерении потенциалов электродов, стремясь с помощью этих измерений получить сведения об электрических плотностях на электродах и с ними связать «коэффициенты фотоэлектрического рассеяния», пришёл в то же время⁴⁵ к неправильному выводу, что «фоторассеяние отрицательного электричества и образование положительного заряда на освещаемом проводнике суть явления разного рода». (Цитируется по Beibl. Ann. d. Phys.).

Изучая зависимость фототока от напряжения, Столетов пришёл к выводу о необходимости учитывать при этом и контактную разность потенциалов между сплошным диском и сеткой. А это привело его к выводу о возможности получения фототока и без вспомогательной батареи, за счёт только контактной разности потенциалов. В первой же его работе⁵³, стр. 1151) читаем:

«Действительно с цинковой сеткой и медным посеребрённым сплошным диском я получил ток. Здесь мы имеем дело с элементом, где освещаемый воздух заменяет жидкость, и который действует пока продолжается освещение, при поддержании тока за счёт энергии излучения». Таким образом, если Риги говорил о фотоэлементе, как аналоге гальванического элемента с разомкнутой внешней цепью, то Столетов независимым путём пришёл к фотоэлементу, дающему ток, как и гальванический элемент. При этом для получения тока используется энергия света. Следовательно, первый действительный фотоэлемент с использованием внешнего фотоэффекта был получен Столетовым. Поэтому, например, Ленард и Вольф²² в приведённой выше цитате и связывают получение фотоэлемента не с именем Риги, а именно с именем Столетова, который, как мы видели, первый получил и практический фотоэлемент, работающий с внешним источником напряжения. Схему Столетова, представленную на рис. 2, б, теперьшие авторы признают и «современной схемой измерения фототоков» (см., например,⁵⁵, стр. 5).

Изучая вольтамперную характеристику фототока для области малых напряжений, Столетов установил пропорциональность между напряжением и током. Это дало ему возможность совершенно оригинальным способом определять контактную разность потенциалов

между металлическими электродами^{5, 35}. Для этого нужно было измерить фототоки i_1 и i_2 для двух небольших приложенных напряжений V_1 и V_2 . Так как действующей разностью потенциалов является $V_1 + K$ и $V_2 + K$, то $\frac{V_2 + K}{V_1 + K} = \frac{i_2}{i_1}$, откуда $K = \frac{i_2 V_1 - i_1 V_2}{i_2 - i_1}$. Опять же следует подчеркнуть, что если в принципе утверждение Риги о том, что в его измерениях отклонение электрометра служило мерой контактной разности потенциалов между электродами, было неверно, то метод Столетова, основанный на изучении вида закономерности $i = f(V)$, является принципиально правильным и для вакуумных чистых условий. Именно в принципе таким методом в фотоэлектрических исследованиях определяют контактную разность потенциалов между электродами и в современных работах.

6. НАЧАЛО ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ И ОТКРЫТИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ФОТОЭФФЕКТА

Отмечая полученные Столетовым выводы, мы должны помнить, что необходимые для них количественные данные он получал, пользуясь таким непостоянным источником света, как электрическая дуга. Так как другого, более подходящего источника ультрафиолетового света в руках экспериментаторов того времени не было, то Столетову пришлось изыскивать методы борьбы с его непостоянством. Из своих наблюдений он пришёл к выводу, что «едва ли есть другой способ так зорко следить за постоянством электрического света (или, вернее, за напряжённостью известной категории радиаций), как эти актино-электрические наблюдения»⁽³⁵⁾, стр. 172—173). А это и навело его на мысль в своих опытах со специально сконструированным откачиваемым фотоэлементом применить для получения сопоставимых данных вспомогательный контрольный фотоэлемент. «Так как интенсивность вольтовой дуги от времени до времени менялась, перед этой же лампой был установлен контрольный конденсатор (диск и сетка в воздухе). Батарея и гальванометр попеременно подключались к новому прибору и контрольному конденсатору и наблюдения относились к показаниям последнего»⁽¹⁴⁾, стр. 92). Это явилось первым практическим применением фотоэлемента.

Но при таком способе контроля возможны ошибки, связанные с быстрыми изменениями в режиме электрической дуги. Поэтому в опытах по уточнению зависимости фототока от расстояния между электродами и напряжения метод был усовершенствован и этот источник ошибок исключен²⁶. Исследуемый и контрольный «конденсаторы» находились в одном и том же световом конусе. Для возможности осуществления этого контрольный конденсатор — фотоэлемент, устанавливавшийся ближе к дуге, был сделан в форме креста и пропускал часть света к исследуемому прибору. К обоим

фотоэлементам подключались два гальванометра одинакового периода, отклонения которых при открывании света отсчитывались одновременно двумя наблюдателями. Это усовершенствование в свою очередь привело Столетова к важнейшему открытию. В своём сообщении²⁶ он писал:

«В этих условиях оба отклонения остаются строго пропорциональными, когда изменяется электрическая дуга без изменения других условий...»

Эта пропорциональность действий в двух разных приборах является довольно замечательной сама по себе: видно, что при всех прочих равных условиях, актино-электрический ток пропорционален интенсивности активных лучей».

Это явилось первой формулировкой того, что впоследствии стало называться первым законом фотоэффекта.

Таким образом, Столетов не только дал схему фотоэлемента, но сам же первый указал на возможность его практического использования — применения в фотометрических целях, сам первый применил его для фотоэлектрического контроля, сам же открыл первый закон внешнего фотоэффекта, являющийся научной основой фотоэлектрической фотометрии. Поэтому по праву следует считать Столетова основоположником фотоэлектрической фотометрии и фотоэлектрического контроля.

Установление первого закона фотоэффекта имело большое принципиальное значение. Ведь это было сделано ещё в период господства волновой теории света, когда было неизвестно, почему фотоэффект вызывается только светом достаточно коротких длин волн. Эта неясность оставалась и после открытия фотоэлектронов, когда можно было предполагать, что их удаление связано с амплитудой вектора электрического поля световых, как было уже известно, электромагнитных волн. Закон Столетова как раз и показывал, что не самой этой амплитудой обусловлено явление, так как фототок пропорционален не ей, а её квадрату. С другой стороны, если с более общей точки зрения полагать, что для удаления электрона (или просто электрического заряда, когда электрон ещё не был известен) нужна определённая энергия, т. е., с точки зрения волновой теории, — определённая интенсивность света, то следовало ожидать наличия порога интенсивности, ниже которого фотоэффект не наблюдался бы.

Таким образом, с целью проникновения в механизм явления чрезвычайно важно было распространить исследования справедливости столетовского закона на как можно больший интервал освещённостей, что и было сделано, как известно, потом в работах уже последующих авторов. Уже на одном этом примере видно, насколько исследования Столетова, не в пример исследованиям Гальвакса, являлись основой логического развития последующих и действительно вели по пути к раскрытию механизма явления.

7. О СВЯЗИ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКИМ ПОГЛОЩЕНИЕМ И ФОТОЭФФЕКТОМ

Глубокий физический смысл имел вывод Столетова о характере того взаимодействия световых лучей с катодом, которое является непосредственной причиной внешнего фотоэффекта. Уже первые опыты, мы видели, приводили к выводу, что открытое Герцем явление заключается в действии света на катод, но каков именно характер взаимодействия света с катодом, какой, более конкретно, процесс лежит в основе явления, это было неясно. Более того, некоторые исследователи¹⁹ старались связать явление не с самыми электродами, а с окружающими или с адсорбированными газами. Здесь немалую роль играла, так сказать, и физическая интуиция Столетова.

Выше мы уже приводили цитату из первой работы Столетова, в которой говорилось о поддержании тока за счёт падающей на фотокатод световой энергии. Но о такой трансформации световой энергии в электрическую нельзя говорить, не предполагая поглощения света. «Что во всех этих явлениях должно происходить поглощение лучей, это мне казалось очевидным ещё раньше, чем я был в состоянии доказать это непосредственно. Именно в связи с этим пришлось мне сказать в моём предыдущем сообщении, что ток моего актино-электрического элемента цинк — воздух — серебро „поддерживается за счёт энергии излучения“», — писал Столетов во втором своём сообщении¹⁸.

Следует отметить, что к выводу о связи между поглощением света катодом и фотоэффектом пришли также Биша и Блондло⁹, повторившие опыты Столетова с заменой металлического катода водяным. При этом они убедились в отсутствии всякого измеримого эффекта. Причину этого они усматривали в экспериментально ими показанной прозрачности воды для лучей, вызывающих действие на металлическом катоде. Для проверки своих соображений, нашедших подкрепление и в работе Биша и Блондло, Столетов распространял исследования на другие жидкости и растворы¹⁸. При этом он сделал дальнейший важный шаг и заключил, что в фотоэффекте играет роль не просто поглощение света всей толщей катода, а «непрозрачность тонкого поверхностного слоя, который является местом нахождения электричества». Останавливаясь на этом вопросе в своей большой статье³⁵, Столетов писал: «С самого начала моих исследований я заподозрил, что в прямой связи с поглощением лучей той или другой пластинкой стоит её чувствительность к актино-электрическому действию...

Лучи, которые освещают воздушный слой, не задевая поверхности (отрицательно) заряженного тела, не производят действия (Гальвакс); лучи должны падать на неё. Мало того, лучи должны поглощаться отрицательно заряженной поверхностью. Очевидно, важно

при этом поглощениe в тончайшем верхнем слое электрода, в том слое, где, так сказать, сидит электрический заряд. Вещество, не вполне прозрачное для активных лучей в виде достаточно толстого слоя, может казаться абсолютно прозрачным с точки зрения такого поверхностного поглощения» (стр. 166—167). В переводе на современный язык речь идёт о поглощении света в слое, откуда выходят фотоэлектроны. Впоследствии это выдвинуло актуальную ещё и сегодня задачу об определении толщин таких слоёв. Интересно отметить, что постепенно происхождение идеи начало сглаживаться в памяти и её открытие связываться с именами гораздо более поздних авторов. Речь идёт о работах Айвса и его сотрудников, относящихся уже к тридцатым годам нашего столетия. Так, например, по этому поводу можно прочитать: «По идее Айвса фототок должен быть пропорционален не количеству света, поглощённого во всей толще фотокатода, а плотности световой энергии в области того слоя металла, из которого выходят фотоэлектроны» (56, стр. 198—199). В ещё более новой книге⁶⁵ на стр. 38 пишется, что необходимость правильно оценивать интенсивность света в эмиттирующем слое якобы вытекает из работ Айвса. Казалось бы, что задолго до этих работ такая мысль должна была стать тривиальной, уже хотя бы на основании прочного утверждения I и II законов фотоэффекта. Так оно на самом деле и было. Именно поэтому Гудден и Поль⁶⁶ говорили, что избирательный фотоэффект является средством электрическим путём обнаружить спектр поглощения адсорбированных атомов. Следовательно, столетовская идея о связи фотоэффекта с поглощением света в эмиттирующем слое в 1925 г. принималась уже как сама собой разумеющаяся. Что это не единственный случай, приведём для примера ещё цитату из статьи Базилевича⁶⁴ того же времени: «Полагая: 1) что поглощение лучистой энергии есть необходимое условие выделения фотоэлектронов (А. Столетов, Актиноэлектрические явления, СПБ, 1889, Journ. de Phys. 9, стр. 468, 1890; Righi, Beibl. zu d. Ann. d. Phys. 12, 1888*) и др.), 2) что фотоэлектроны выделяются и из внутренних слоёв (Ruhens und Ladenburg, Verh. d. D. Phys. Ges. 9, 749, 1907) и 3) что фотоэлектрический эффект пропорционален количеству поглощённой энергии (А. Столетов, loc. cit., Lenard. Wied. Ber., 108 (IIa), 1649, 1899, Ann. d. Phys. (4) 1, 359, 1910; Richtmeyer, Phys. Rev. 29, стр. 71, 404, 1909), найдем...». На самом деле заслугой школы Айвса явилось не выдвижение этой старой, столетовской идеи, а изыскание способов подтверждения её в случае селективного фотоэффекта.

Чтобы проверить свою мысль о связи фотоэффекта с поглощением света, Столетов провёл, как уже упоминалось, многочисленные

^{*)} В реферах работ Риги в Beibl. Ann. d. Phys. за 1888 г. мы не находим никаких высказываний по данному вопросу.

опыты с различными веществами. Особенно интересны в этом отношении опыты как с водными растворами различных красителей, так и с высушенными их плёнками. «Но жидкости, густо окрашенные, оптически непрозрачные даже в тонких слоях, оказывались обычно непрозрачными и в актино-электрическом отношении и соответственно тому обнаруживали значительную чувствительность». Эта чувствительность некоторых красок значительно превосходила чувствительность всех известных тогда металлических электродов. Кроме вывода о связи фотоэлектронной эмиссии с поглощением света, Столетов сделал и другой существенный вывод: «При первых опытах я удовольствовался тем результатом, что нашлись жидкости, которые ведут себя подобно металлам, что жидкое состояние само по себе не есть препятствие для актино-электрической чувствительности»⁵⁵, стр. 168—169). Действительно, это так. Но в последующих исследованиях выяснилось, что жидкости не фотоактивны при $\lambda > 1750 \text{ \AA}$. Чувствительность водных растворов органических красителей при больших длинах волн оказалась связанный с образованием на поверхности тончайших твёрдых плёнок⁵⁷. Не безинтересно вспомнить, что та же идея о связи между оптическим поглощением и чувствительностью катода легла в основу опытов по очувствлению фотокатодов щелочных металлов теми же красителями больше чем через 40 лет⁵⁸.

Вслед за Столетовым опыты в этом направлении были продолжены Гальваксом²⁵, который пришёл к выводу, что действительно значительное фотоэлектрическое действие связано с большим оптическим поглощением, но обратное заключение не всегда оправдывается. Всё же он соглашается, что положение Столетова может быть принято в качестве рабочей гипотезы в дальнейших исследованиях.

Уловив, что сущность фотоэлектрического процесса основана на поглощении света, Столетов поднял большую физическую проблему, которая не могла быть так скоро решена. Эта проблема связи между оптическим поглощением и фотоэлектронной эмиссией, т. е. характера взаимодействия света с веществом, в связи с фотоэффектом, действительно явилась одной из кардинальных и во всё последующее время. Достаточно вспомнить хотя бы ту важность, которую она приобрела в период исследования избирательного (селективного) фотоэффекта. Актуальной она остаётся ещё и в наши дни (вспомним хотя бы экситонный фотоэффект).

8. ЯВЛЕНИЕ УТОМЛЕНИЯ. ИНЕРЦИОННОСТЬ

Проводя сравнительные исследования чувствительностей различных тел, в частности металлов, и влияния на эту чувствительность состояния поверхности⁵⁵, стр. 170), Столетов обратил внимание на явление, известное нам, но не всегда и теперь ещё ясное, которому он дал название «утомление» (см. также²⁶, стр. 170). И другие

исследователи, в частности ещё Гальвакс, замечали влияние на чувствительность металлических пластин состояния освещаемой поверхности и изменения этого состояния со временем. Но именно метод Столетова наблюдения фототока позволял не только чётко обнаружить, но и проследить за ходом процесса утомления во время самого освещения электрода. Утомление особенно сильно было выражено у свежеочищенных металлов и постепенно уменьшалось со старением поверхности. Из этого Столетов извлёк практический урок для проведения количественных опытов: «Поэтому, при опытах, требующих постоянства эффекта в течение некоторого времени, я предпочитаю не употреблять только что чищенного диска, а делать чистку за несколько часов, ещё лучше накануне». Интересно, что в наше время, при создании неутомляющихся сурьмяно-цезиевых фотоэлементов, Хлебников⁵⁹ пользовался похожим методом, а именно он на сильном свету доводил фотоэлементы до предельного утомления, после чего они оставались уже стабильными. Подобный приём рекомендуют делать и при пользовании фотоумножителями (65, стр. 165).

Наконец, Столетов выдвинул очень важный и для физической характеристики явления, и для практики вопрос об инерционности фотоэлектрических токов и дал первое его решение. Уже в первой своей работе⁵ он отмечал, что все изменения в освещющей катод дуге мгновенно отражаются на фототоке. Боргман²⁰ решил с помощью телефона, включённого в цепь фотоэлемента, проверить, насколько в самом деле безинерционен фототок. Если явление безинерционно, рассуждал автор, то, освещая катод прерывистым светом, я услышу в телефоне звук соответствующей высоты. На опыте он не услышал ожидаемого тона и только слышал щелчки в телефоне при замыкании и размыкании цепи фотоэлемента. Из этого он сделал вывод, что фотоэлектрический ток не модулируется в согласии с модуляцией света, и заключил об очень большой инерционности явления. Столетов, проанализировав условия опыта, заключил, что причиной такого результата могла быть недостаточная чувствительность индикатора переменного тока — телефона. Щелчки при замыкании и размыкании цепи могли быть связаны со значительно более сильными ёмкостными токами. Поэтому Столетов разработал очень остроумную методику, основанную на идее сдвига фаз между оптической модуляцией и временами отбиения фототока, измеряемого чувствительным гальванометром. Этот принцип лежит в основе и многочисленных современных установок для измерения инерционности фотоэлектрических явлений, получивших особенно большое распространение и развитие в связи с изучением элементарных процессов при фотоэлектрических явлениях в полупроводниках. Из тщательных экспериментов, учтя ошибки опытов, Столетов получил результаты, из которых следовало, что запаздывание тока по отношению к освещению не превышает 0,001 секунды. Этот замечатель-

ный по тому времени результат, доказывающий практическую для того времени безинерционность фототоков, был впоследствии уточнён другими авторами^{60, 61}, особенно на базе уже новой экспериментальной техники^{62, 67}.

9. ДРУГИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭТОГО ПЕРИОДА

Не останавливаясь на остальных, по нашему мнению менее принципиальных, результатах исследований Столетова, посмотрим, что ещё достойного внимания было сделано в области внешнего фотоэффекта за данный небольшой период времени. Нужно сказать, что не все из ещё не цитировавшихся работ приведённого в конце списка заслуживают внимания. Результаты некоторых из них впоследствии не оправдались^{8, 19, 22}. В некоторых^{10, 37, 38} заведомо были допущены методические ошибки и получены совершенно искажённые результаты (действие света и на положительно заряженные тела, причём иногда даже большее, чем на заряженные отрицательно).

Гальвакс к фундаментальным результатам причислял^(52, стр. 258; 284) установление им наличия внешнего фотоэффекта у полупрозрачных серебряных пленок при освещении их с тыла — со стороны прозрачной подложки³¹. Однако, если считать ранее установленной связь фотоэффекта с оптическим поглощением в приповерхностном слое, то этот опыт является только иллюстрацией данного положения.

В попытках разнообразить условия эксперимента уже в этот период было положено начало применений поляризованного света¹⁵ и магнитного поля^{47, 48}, но пока без существенных результатов.

Авторами рассматриваемого периода постепенно накапливались данные по перечню тех материалов, которые являются фотоэлектрически чувствительными. Первые наблюдения производились с металлами. Биша и Блондло, а также Столетов положили начало исследованиям жидкостей. Риги^{12, 18, 23} показал, что внешний фотоэффект наблюдается и для диэлектриков (эбонит, сера). В последней работе он применил для обнаружения зарядов на поверхности облучаемого изолятора остроумный метод клейденографии.

Делались попытки установления связи между фотоэлектрической активностью металлов и их контактными потенциалами (положением в ряду Вольта). В нынешнее время ясно, что надёжные данные в этом отношении могли быть получены только в хороших вакуумных условиях, в то время совершенно не достижимых. Поэтому не удивительно, что, например, Столетов не мог установить какой-нибудь систематической связи между этими свойствами³⁵. Риги, проводя исследования с помощью электрометрической методики в усложнённых условиях, получал противоречивые результаты в разных работах. Так, сначала¹⁸ он пришёл к выводу, что интенсивность фотоэлектрического разряжения отрицательно заряженных тел уменьшается вдоль ряда Вольта от электроположительных к электроотрицательным

металлам, а изменение степени фотоэлектрического заряжения нейтральных тел следует ряду Вольта в противоположном направлении. Вероятно уже под влиянием этого результата, а также под влиянием Гальвакса, в первых своих работах намекавшего на наличие разных явлений: фотоэлектрического разряжения и фотоэлектрического возбуждения, у Риги начало складываться высказанное им потом⁴⁵ убеждение, что якобы это — «явления разного рода». Однако позже²³ он пришёл к выводу, что ряд фотоэлектрических активностей металлов не соответствует Вольтовому ряду напряжений, а ещё позже²⁴ установил, в общем, согласованное поведение металлов в отношении фотоэлектрического разряжения и заряжения.

Эльстер и Гайтель обратили особое внимание на то обстоятельство, что наибольшей фотоэлектрической чувствительностью обладали электроположительные металлы. Так, у первых авторов особенно популярным объектом исследования, вследствие его высокой тогда чувствительности, был цинк. Магний и алюминий у Эльстера и Гайтеля²⁹ оказались ещё более чувствительными. Эта увеличенная фоточувствительность к неразложенному свету оказалась связанной с более широким спектральным интервалом актиничного, по отношению кенным металлам, света. Так, упомянутые авторы показали, что цинк, магний, алюминий чувствительны не только к богатому далёкими ультрафиолетовыми лучами свету искусственных источников, но и к рассеянному солнечному свету голубого неба. Подобные результаты для цинка были получены раньше и Гоором¹⁹, но Эльстер и Гайтель несколько удивились тому обстоятельству, что он обнаружил чувствительность к дневному свету даже меди и латуни, что ими никак не могло быть подтверждено. В упоминавшемся вначале сообщении Нодона³⁴ не указано, с каким именно металлом он производил свои наблюдения. Столетов³⁵ и Риги^{15, 32, 4} подчёркивали, что никаких следов действия солнечного света они не могли обнаружить и объясняли это тем, что поглощение в атмосфере обрезает актиничные лучи солнечного спектра. Однако у Столетова не указывается, с каким именно металлом он проводил опыт на солнечном свете. Вероятно, это было серебро.

Результаты, полученные Эльстером и Гайтелем с цинком, алюминием и магнием, привели их к мысли подвергнуть испытаниям наиболее электроположительные металлы — щелочные металлы. Таким образом они и пришли к опытам с амальгамированным натрием^{30, 46}, а впоследствии, уже после рассматриваемого периода, и к созданию фотокатодов из щелочных металлов, что явилось чрезвычайно важным этапом в эволюции фотокатодов.

Большое внимание было уделено выяснению механизма переноса отрицательного заряда с освещаемого тела. Не является ли сам световой пучок особого рода проводником, через который происходит удаление заряда? Для ответа на такой любопытный для нас вопрос Биша¹⁷ был проделан опыт с полым металлическим цилиндром. Освещ-

щая актиничным светом наружную поверхность цилиндра, он наблюдал значительное ускорение потери сообщённого цилиндуру отрицательного заряда. Освещение же через малое отверстие внутренней части цилиндра не приводило к заметному влиянию. «Если бы — писал автор — пучок света являлся видом проводника, он бы в одинаковой мере обусловливал разряжение в том и другом случае». Отрицательный результат опыта Биша следовал уже из установленной Столетовым пропорциональности между величиной фототока и площадью освещаемой поверхности катода.

Независимо поставленные Риги^{12, 18} и Биша¹⁷ опыты с лёгкими металлическими крыльышками на вертикальных подвесах («электрическое Сегнерово колесо») показали, что при освещении отрицательно заряженного листочка крыльчатки подвесная система приходит в движение, что можно зарегистрировать с помощью зеркальца. Из этого оба автора сделали вывод об электрической конвекции с помощью частиц воздуха. Такой вывод у Столетова являлся естественным следствием из результатов исследования фототоков при разных давлениях. Однако Риги, придавая, очевидно, этому вопросу особое значение, вновь и вновь к нему возвращался^{12, 18, 21, 23, 24, 45, 48}. В связи с этим очень интересно привести цитату из § 18 большой статьи Столетова³⁵, где он писал: «Но как бы то ни было, мысль о конвекции зарядов тем или другим путём т. е. частицами ли газа, или пылинками катода — ещё не есть полное объяснение всего явления, как, повидимому, склонны думать некоторые. Эта мысль объясняет нам как продолжается удаление заряда через газ, объясняет почему только в газовой среде явление может обнаружиться; но мы ещё не понимаем вполне почему и как начинается процесс. Почему те или другие частицы отделяются от поверхности электрода, почему действие униполярно почему оно стимулируется лишь лучами известной категории и стоит в тесной связи с поглощением этих лучей поверхностью катода? Эти-то пункты и составляют главный нерв загадки».

Из приведённой цитаты видно, насколько отчётливо представляя Столетов основные проблемы в данной области, тогда как другие исследователи часто главное видели в сопутствующем. Ярким примером этого и является ряд работ Риги по изучению путей движения заряженных частиц, осуществляющих электрическую конвекцию^{12, 18, 23, 24, 45}, или по изучению электрической плотности на исследуемых электродах, якобы определяющей эффект^{15, 18, 21, 24}. Если мы обратимся к литературному указателю, то увидим, насколько энергичную деятельность в области фотоэффекта развил в данный период Риги. Часто он ставил остроумные и тонкие по тому времени эксперименты, как, например, изящный опыт с применением метода клейденографии по определению скоростей в электрическом поле заряженных частиц воздуха¹⁸, интересный опыт по доказательству движения заряженных частиц по силовым линиям электрического поля²³. Но

хотя всё это, может быть, в какой-то степени и подготовляло будущие результаты Эльстера и Гайтеля и Ленарда, сам же по себе не привело к каким-нибудь классическим результатам, относящимся к проблеме фотоэффекта, к таким фундаментальным, да ещё в таком количестве результатам, которые можно было бы в какой-то мере сопоставить с результатами Столетова.

10. ИТОГИ

Подводя итоги исследованиям за время 1887—1899 гг., Гальвакс⁵² писал: «Из обозрения работ первого периода получается, что почти все принципиальные успехи были достигнуты в первые три года со времени открытия этой области» и далее эти важнейшие результаты систематизировал следующим образом (стр. 284):

1. Общие результаты. 2. Данные относительно электрической проводимости в газах. 3. Данные относительно фотоэлектрического возбуждения. 4. Последующие данные (т. е. данные после 1889 г.).

Группа вопросов 4 нас в данном случае не будет интересовать. Если принять во внимание понятную из предыдущего пристрастность автора в вопросах группы 3 и очевидное главенствующее и по обзору Гальвакса значение результатов Столетова по группе вопросов 2, то представляет интерес привести полностью формулирование Гальваксом общих результатов:

1. Общие результаты

Действие света совершается на телах, а не на окружающем газе. Необходимым условием является поглощение света. Разряжающиеся количества электричества пропорциональны интенсивности света. Фотоэлектричество вызывает свет, поступающий также и сзади. (Речь идёт о полупрозрачной металлической плёнке.) Потеря времени на возникновение явления или последействие не имеет места. Очень большое количество различных тел оказываются фотоэлектрически активными».

Из перечисленных здесь шести пунктов выяснение второго, третьего и пятого является заслугой Столетова. Если примем во внимание, что в возникновении шестого имеется его вклад наряду с другими авторами, а пункт чётвёртый является следствием второго, то, несмотря на то, что здесь не отмечено принципиальное и огромной важности практическое значение методики Столетова, видна его первенствующая роль, если не говорить о самом открытии явления.

Итак, мы приходим к следующему резюме. После открытия внешнего фотоэффекта Герцем, Видеман и Эберт отчётливо показали, что явление характерно только для катода и не наблюдается на аноде. Гальвакс поставил опыты по обнаружению фотоэффекта на отрицательно заряженных телах в очень простой, привлекательной

форме, а также первый показал, что свет приводит не только к разряжению отрицательно заряженных тел, но и к некоторому небольшому положительному заряжению нейтральных, хотя его выводы из фактов и запутывали вопрос. Однако предложенная Гальваксом и Риги и принятая другими исследователями электрометрическая методика исследования (наблюдение потенциалов и их изменений) оказалась неплодотворной, не могущей являться основой для дальнейшего прогресса в этой области. Такой основой явился метод Столетова наблюдения фотоэлектрических токов. Благодаря ему именно Столетов явился основоположником количественных исследований явления, а его «сетчатый конденсатор» явился прототипом современного фотоэлемента, хотя само название «фотоэлемент» впервые было применено Риги. Сам же Столетов впервые применил метод фотоэлектрического контроля интенсивности света, благодаря чему им были получены результаты, приведшие к установлению первого закона фотоэффекта, в свою очередь явившегося теоретической основой фотоэлектрической фотометрии. При этом Столетов изыскал первый способ борьбы с явлением, названным им «утомлением» фотокатодов. Им была выдвинута проблема инерционности внешнего фотоэффекта и дано первое ее решение с допускающейся тогдашними техническими средствами точностью (до 0,001 сек.). Он же поднял кардинальную, и поныне актуальную в области внешнего фотоэффекта проблему связи между фотоэффектом и поглощением света в эмиттирующем слое. Изучая вольтамперные характеристики фототоков, он заложил основы фотоэлектрического метода определения контактной разницы потенциалов, а перенеся эти исследования в разреженные газы, открыл существование тока насыщения, а также заложил основы газоразрядного усиления фототоков, не говоря уже о тех выдающихся результатах, которые были получены для проблемы самого газового разряда и известны под названием «явление Столетова».

Определенный вклад в данный период был сделан работами Биша и Блондло, Риги, Эльстера и Гайтеля. Очень существенным явилось выяснение того обстоятельства, что большая фоточувствительность связана с электроположительными свойствами металла. В связи с работами по фотоэффекту Риги были также получены результаты, хоть и не относящиеся непосредственно к фотоэффекту, но имевшие существенное значение для других областей электроники.

Однако ни один из авторов того периода не может конкурировать со Столетовым в получении такого количества выдающихся, принципиального и практического значения результатов в области внешнего фотоэффекта, которые сами по себе являлись достаточно широкой основой для дальнейшего развития исследований. Мы должны признать, что если открытие явления принадлежит Герцу, то в заложении основ изучения и применения внешнего фотоэффекта первое место, безусловно, принадлежит Столетову.

ЛИТЕРАТУРА

I. Литература по внешнему фотоэффекту
за 1887—1900 гг.

1. H. Hertz, Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung, *Wied. Ann.* **31**, 983 (1887).
2. E. Wiedemann und H. Ebert, Ueber den Einfluss des Lichtes auf die elektrischen Entladungen, *Wied. Ann.* **33**, 241 (1888). (См. также краткое изложение в *Phil. Mag.* (5) **25**, 162 (1888), заимствованное из *Sitzber. d. phys. — med. Inst. d. Erlangen*.)
3. W. Hallwachs, Ueber den Einfluss des Lichtes auf elektrisch geladene Körper, *Wied. Ann.* **33**, 301 (1888). (Реферат в *ЖРФХО* **20**, физ. отд., отд. 2, в. 5, 41 (1888).)
4. A. Righi, Di alcuni nuovi fenomeni elettrici provocati delle radiazioni, I Nota, *Rend. Linc.* **4**, 1 Sem., 185 (1888), а также: *Nuovo Cim.* **23**, 61 (1888); *Phil. Mag.* **25**, 314 (1888); *Journ. de Phys.* **7**, 153 (1888). (Реферат в *Beibl. Ann. d. Phys.* **12**, 286 (1888).)
5. A. Stoletoff, Sur une sorte de courants électriques provoqués par les rayons ultravioletts, *C. R.* **106**, 1149 (1888). (Сообщение перепечатано в *Phil. Mag.* **26**, 317 (1888); реферат в *Beibl. Ann. d. Phys.* **12**, 605 (1888).)
6. Observations de M. Edm. Becquerel à propos d'une Note de M. A. Stoletoff, présentée à l'Académie dans sa dernière séance, *C. R.* **106**, 1213 (1888).
7. A. Righi, Sur les phénomènes électriques produits par les rayons ultravioletts, *C. R.* **106**, 1349 (1888).
8. И. И. Боргман, О влиянии света на электрическое разряжение, *ЖРФХО* **20**, физ. отд., отд. 1, в. 4, 111 (изложение доклада); *Phil. Mag.* **26**, 272 (1888).
9. E. Bichat et R. Blondot, Action des radiations ultraviolettes sur le passage de l'électricité à faible tension au travers de l'air, *C. R.* **106**, 1349 (1888).
10. F. Narr, Ueber die Wirkung des Lichtes auf statische Ladungen, *Wied. Ann.* **34**, 712 (1888). (Реферат в *ЖРФХО* **20**, физ. отд., отд. 2, 64 (1888).)
11. W. Hallwachs, Ueber die Elektrisierung von Metallplatten durch Bestrahlung mit elektrischen Licht, *Wied. Ann.* **34**, 731 (1888).
12. A. Righi, Di alcuni nuovi fenomeni elettrici, provocati delle radiazioni, *Rend. Linc.* **4**, 1 Sem., II Nota, 498 (1888); III Nota, 578 (1888); IV Nota, 691 (1888). (Реферат в *Beibl. Ann. d. Phys.* **12**, 721 (1888).)
13. A. Stoletoff, Sur les courants actino-électriques au travers de l'air, *C. R.* **106**, 1593 (1888). (Реферат в *Beibl. Ann. d. Phys.* **12**, 723 (1888).)
14. A. Stoletoff, Suite des recherches actino-électriques, *C. R.* **107**, 91 (1888); Собр. соч., т. I, Гостехиздат, М.—Л., 1939, стр. 267; Издр. соч., Гостехиздат, М.—Л., 1950, стр. 246. (Реферат в *Beibl. Ann. d. Phys.* **12**, 723 (1888).)
15. A. Righi, Di alcuni nuovi fenomeni elettrici, provocati delle radiazioni, V Nota, *Rend. Linc.* **4**, 2 Sem., 16 (1888), VI Nota, *Rend. Linc.* **4**, 2 Sem., 66 (1888). (Реферат в *Beibl. Ann. d. Phys.* **13**, 198 (1889).)

16. E. Bichat et R. Blondlot, Action combinée de l'insufflation et de l'illumination sur les couches électriques qui revêtent les corps conducteurs, C. R. **107**, 29 (1888).
17. E. Bichat, Sur les phénomènes actino-électriques, C. R. **107**, 557 (1888).
18. A. Righi, Sui fenomeni elettrici provocati dalle radiazioni, I Memoria, Mem. di Bologna **9**, 369 (1888). (Сводная статья по ¹² и ¹⁵. Краткие итоги в C. R. **107**, 559 (1888).)
19. M. Hoor, Ueber den Einfluss des ultravioletten Lichtes auf negativ elektrisch geladene Konduktoren, Wien. Ber., Abt. II **97**, 719 (1888). (Реферат в ЖРФХО **21**, физ. отд., отд. 2, 11 (1889).) См. также: Rep. d. Phys. **25**, 91 (1889); Zentralbl. f. Elektrot. **11**, 314; 340 (1889).
20. И. Боргман, К исследованию актино-электрических явлений, Предв. сообщ., ЖРФХО **21**, 23 (1889); C. R. **108**, 733 (1889).
21. A. Righi, Sulla cariche elettriche generate dalle radiazioni, Rend. Linc. **5**, 1 Sem., 331 (1889). (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. **13**, 566 (1889).)
22. P. Lenard und M. Wolf, Zerstäuben der Körper durch ultraviolettes Licht, Wied. Ann. **37**, 443 (1889).
23. A. Righi, Sui fenomeni elettrici provocati dalle radiazioni, II Memoria Atti Ist. Veneto **7** (1889), 25 стр.; Nuovo Cim. **25**, 193 (1889). (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. **13**, 567 (1889).)
24. A. Righi, Sui fenomeni elettrici provocati dalle radiazioni, III Memoria, Atti Ist. Veneto **7** (1889), 54 стр.; Nuovo Cim. **26**, 135; 217 (1889); **27**, 33 (1890). (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. **13**, 976 (1889).)
25. W. Hallwachs, Ueber den Zusammenhang des Elektrizitätsverlustes durch Beleuchtung mit der Lichtabsorption, Wied. Ann. **37**, 666 (1889); Gött. Nachr., 325 (1889).
26. A. Stoletow, Sur les phénomènes actino-électriques, C. R. **108**, 1241 (1889). (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. **13**, 902 (1889).)
27. A. Stoletow, Lettera alla direzione del giornale «Il Nuovo Cimento», N. Cim. **26**, 58 (1889).
28. A. Righi, Osservazioni alla precedente lettera, N. Cim. **26**, 59 (1889).
29. J. Elster und H. Geitel, Notiz über die Zerstreuung der negativen Elektrizität durch das Sonnen- und Tageslicht, Wied. Ann. **38**, 40 (1889).
30. J. Elster und H. Geitel, Ueber die Entladung negativ elektrischer Körper durch das Sonnen- und Tageslicht, Wied. Ann. **38**, 497 (1889).
31. W. Hallwachs, Lichtelektrische Versuche, Tagebl. Naturforschver- samml. zu Heidelberg, 214 (1889).
32. A. Righi, Ueber die durch Strahlung hervorgerufenen elektrischen Erscheinungen, Rep. d. Phys. **25**, 380 (1889). (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. **14**, 68 (1890).)
33. A. Righi, Sulla misura delle forze elettromotorici di contatto dei metalli in vari gas, per mezzo delle radiazioni ultraviolette, Rend. Linc. **5**, 1 Sem., 860 (1889). (Реферат в ЖРФХО **22**, физ. отд., отд. 2, 43 (1890) и в Beibl. Ann. d. Phys. **14**, 69 (1890).)
34. A. Nodon, Étude sur les phénomènes électriques produits par les radiations solaires, C. R. **109**, 219 (1889).

35. А. Столетов, Актино-электрические исследования, ЖРФХО 21, физ. отд., отд. 1, 159 (1889); Собр. соч. т. I, Гостехиздат М.—Л., 1939, стр. 217; Избр. соч., Гостехиздат, М.—Л., 1950, стр. 246. (Есть перевод на нем. яз. в Physikalische Revue I, 723 (1892). На русском яз. была издана отдельной брошюрой в СПБ (1889); частично см. в La lumière électrique 34, № 47—52, 576 (1889). Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. 14, 322 (1890).)

36. J. Elster und H. Geitel, Elektrische Beobachtungen auf dem hohen Sonnblitz, Wien. Ber. 99, 1008 (1890).

37. E. Branly, Déperdition des deux électricités dans l'éclairage par des radiations très réfrangibles, C. R. 110, 751 (1890). (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. 14, 539 (1890).)

38. E. Branly, Courants photoélectriques entre les deux plateaux d'un condensateur, C. R. 110, 898 (1890). (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. 14, 541 (1890).)

39. W. Hallwachs, Untersuchung einer Fehlerquelle bei der lichtelektrischen Erregung, Wied. Ann. 40, 332 (1890).

40. W. Hallwachs, Vorlesungsversuch zum Nachweis der lichtelektrischen Erregung, Wied. Ann. 40, 343 (1890).

41. W. Hallwachs, Bemerkungen zu einem Prioritetsanspruch des Herrn Righi, Wied. Ann. 40, 338 (1890); N. Cim. 28, 59 (1890).

42. A. Righi, Erwiderung auf die Bemerkung des Herrn W. Hallwachs. Wied. Ann. 41, 505 (1890); N. Cim. 28, 62 (1890).

43. J. Elster, Ueber die Entladung negativer Elektrizität durch Licht im magnetischen Felde, Naturw. Verein. Braunschweig, 24, IV (1890).

44. A. Stoleto w, Sur les courants actino-électriques dans l'air rarefié Journ. de Phys. 9, 468 (1890); Собр. соч. т. I, Гостехиздат, М.—Л., 1939, стр. 270; Избр. соч., Гостехиздат, М.—Л., 1950, стр. 249; Bull. Soc. fr. de Phys. 202—207 (1890). (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. 15, 233 (1891).)

45. A. Righi, Sulla traiettorie percorsa nella convenzione fotoelettrica, e su alcuni nuovi fenomeni elettrici nell'aria rarefatta, Rend. Linc. 6, 2 Sem., 81 (1890); Sulla convenzione fotoelettrica e su altri fenomeni elettrici nell'aria rarefatta, IV Memoria, Mem. di Bologna 10, 85 (1890). (Извлечение — N. Cim. 30, 197 (1891).) (Реферат в Beibl. Ann. d. Phys. 14, 1167 (1890).)

46. J. Elster und H. Geitel, Ueber die Verwendung des Natriumamalgams zu lichtelektrischen Versuchen, Wied. Ann. 41, 161 (1890).

47. J. Elster und H. Geitel, Ueber den hemmenden Einfluss des Magnetismus auf lichtelektrische Entladungen in verdünnten Gasen, Wied. Ann. 41, 166 (1890).

48. A. Righi, Sulla convezione elettrica, Rend. Linc. 6, 1 Sem., 151 (1889). (Рефераты в ЖРФХО 22, в. 7, физ. отд., отд. 1, 147 (1890) и в Beibl. Ann. d. Phys. 14, 663 (1890).)

II

49. Н. А. Капцов, Учёные записки Московского университета 52, 71, 1940; Н. С. Хлебников, УФН 22, 384 (1939).

50. Ж. Г. Де-Бур, Электронная эмиссия и явления адсорбции, ОНТИ, М.—Л., 1936, стр. 22; Г. Симони и Р. Зурман, Фотоэлементы и их применение, ОНТИ, М.—Л., 1936, стр. 11; А. Л. Юзи и Л. А. Дю Бридж, Фотоэлектрические явления, ОНТИ, М.—Л., 1936, стр. 6—7.

51. ЖРФХО 20, физ. отд., отд. 2, 41 (1888).

52. W. Hallwachs, Die Lichtelektrizität, Handb. d. Radiol., IIIb, стр. 245—618, Leipzig, Akad. Verlagsges. MBH (1916).

53. J. Elster und H. Geitel, Wied. Ann. **46**, 287 (1892).

54. J. Elster und H. Geitel, Wied. Ann. **52**, 433 (1894).

55. V. K. Zworykin and E. G. Rutherford, Photoelectricity and its Applications, J. Wiley and Sons, New York, 1949, стр. 5.

56. Л. Н. Добреполов, Электронная и ионная эмиссия, Гостехиздат, М.—Л., 1952, стр. 198—199.

57. O. Rhode, Ann. d. Phys. **19**, 935 (1906).

58. A. R. Olpin, Phys. Rev. **36**, 251 (1930).

59. Н. С. Хлебников, Физ. Зап. **9**, 171, 1941; ЖТФ **15**, 99 (1945).

60. J. Elster und H. Geitel, Phys. Zs. **13**, 468 (1912).

61. E. Marx und K. Lichtenegger, Ann. d. Phys. **41**, 124 (1913).

62. E. O. Lawrence and J. W. Beams, Phys. Rev. **29**, 903 (1927); Phys. Rev. **32**, 478 (1928).

63. E. Gudden und R. Pohl, Zeits. f. Phys. **34**, 245 (1925).

64. В. В. Базилевич, ЖРФХО, ч. физ. **56**, в. 4, 421 (1925).

65. Н. О. Чечик, С. М. Файнштейн и Т. И. Лифшиц, Электронные умножители, Гостехиздат, М., 1954.

66. А. М. Бутов и Е. Г. Швидковский, УФН **48**, 151 (1952); С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, стр. 11, Гостехиздат, М. (1953).

67. A. T. Forrester, R. A. Gundmundsen and Ph. O. Johnson, Phys. Rev. **99**, 1691 (1955).