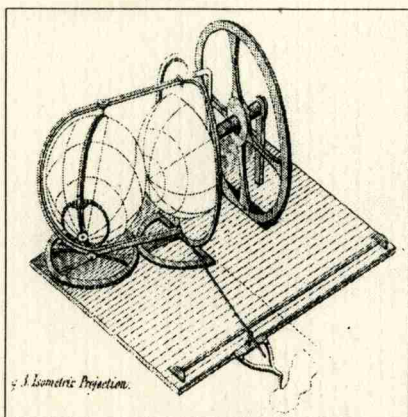


Приложение к переводу максвелловского

*"Трактата
об Электричестве
и Магнетизме"*



УДК 537.8 (09)
ББК 22.3г

**П76 Приложение к переводу максвелловского “Трактата об
Электричестве и Магнетизме”.**

У. Нивен. Жизнь и научная деятельность Дж. К. Максвелла.
В переводе М. Л. Левина.

Особенности максвелловского “Трактата об Электричестве
и Магнетизме” и принципы научного перевода. *М. Л. Левин,
М. А. Миллер, Е. В. Суворов.*

— Н. Новгород: ИПФ РАН, 1998. — 68 с.

ISBN 5-201-09314-0

В работе объединены два текста: 1. Изложение на русском языке биографии Дж. К. Максвелла, сделанное когда-то М. Л. Левиным с английского Предисловия проф. У. Д. Нивена к собранию научных трудов Максвелла. 2. Заново отредактированные выдержки из Послесловия к русскому изданию максвелловского “Трактата об электричестве и магнетизме”, вышедшему в издательстве “Наука” в 1989 г.

Читатели, сохраняющие интерес к истории науки, смогут еще раз ознакомиться с жизнью Максвелла и проследить за ходом его рассуждений, приведших к провозглашению знаменитых уравнений макроэлектродинамики.

Какое-то время тому назад был завершен и опубликован русский перевод максвелловского "Трактата об Электричестве и Магнетизме". Мы работали над ним много лет. И было нас четверо: Б. М. Болотовский, И. Л. Бурштейн, М. А. Миллер, Е. В. Суворов. А главный редактор — М. Л. Левин.

Даже за время, затраченное на сам перевод, его редактирование и оформление текста (что-то около 10 лет), произошло несколько влияющих событий. Умер П. Л. Капица, по инициативе которого была затеяна вся наша работа, умер, так и не успев написать напутствие этому, так сказать, русскому посланцу из Незабываемого Девятнадцатого Века, разумеется! И как будто бы его уход означал собой завершение многих других эпох, а также других, казалось бы, устойчиво развивающихся начинаний. В частности, вдруг с какой-то незаметной неожиданностью стала ослабевать среди нашего ученого люда потребность ознакомления с произведениями классиков наук в *русском* переизложении. А вскорости эта тенденция, выражаясь по-современному, достигла своего беспредела. Особенно коснулась она англоязычных произведений, поскольку знание английского языка все более и более становилось культурной необходимостью любого интеллектуала, тянущегося к международной информированности. И возникало вроде бы вполне объяснимое сомнение, а нужно ли тогда вообще делать переводы научной литературы на какой-либо родной (материнский) язык при умеренно хорошем знании "соседнего", английского, неродного. Не проще ли и не полезнее поступить наоборот: всю научную продукцию сразу же излагать и представлять на всеобщее использование на едином (английском!) языке.

Ответ не так уж и очевиден, ибо ясно, как Божий день, что опасность одноязычия грозит именно *всемирности* и *всемерности* культуры и науки. Английский язык, конечно, сам по себе многовариантен, богат вольностями и переливами, но все же, как всякий *язык единого общения и единого мышления*, он ограничен сводом своих законов и понятий. И следовательно, у него есть своя, им и только им меченая, область творческого проникновения. И не мы одни убеждены в том, что процветание *мигонародной* цивилизации в целом (если, конечно, она в этом процветании продолжает нуждаться!) должно опираться на многие

развитые языки, числом не устанавливаемые заранее, но заведомо многие, по каким-то параметрам слабо зависимые друг от друга и оснащенные всеми средствами выражения рассудительности и чувств. И не перекошенные в ту или иную сторону "флюсоподобно" – ни в техническую, ни в художественную.

До недавнего времени к такому "джентельменскому набору" языков относился и русский. Помимо всего прочего, он был еще и государственным языком огромной Империи, пусть даже Империи Зла, но ведь зачастую Зло исполняет функцию единения решительнее, чем Добро! Вместе с исторически сложившимися традициями обслуживания разнообразных потребностей людей русский язык, несмотря на очевидные трудности, связанные с использованием кириллицы (а впрочем, одновременно это и мера защиты от порабощения чужезычием!), оказался весьма вместительным и гостеприимным для введения в него новой лексики, успевающей все-таки поспешать за шквалами новых понятий. Даже поток английских терминов и команд, хлынувший во все деловые и развлекательные занятия через компьютеры и компьютерные сети и приведший к разбуханию фактически всех национальных (не только русского!) языков, пока еще не подмял, не поработил, не лишил сущности – смысловой и художественной – язык, на котором пишется, в частности, текст этого предисловия*. И не только оно *написано* на этом языке – оно на этом языке *продумано!!!*

Это очень важный аргумент, иногда забываемый при отстаивании *прав языка на первозначимость!* Всемирное одноязычие привело бы к однообразию (одинаковости) думанья, к ущемлению просторности

* У нас принято сейчас почти все неудачно случившееся и не случившееся валить на большевиков, вернее, на большевистские оголтело-невежественные методы правления людьми. В самом деле, руководствуясь своими идеологическими догмами или вообще ничем не руководствуясь, кроме самодурства, они в свое время приостановили развитие кибернетики в широких общенародных масштабах и тем, несомненно, дали "обратную фору" всем нам в освоении новой технологии, новой культуры, и, если угодно, нового способа думанья. Однако не стоит преувеличивать роль этих самоуправных правителей в деле подпорчивания родного *русского* языка – новоязные канцеляризмы стали возникать синхронно-лавиной почти сразу во всех языках после первой мировой войны независимо от политических строев, а они выглядят куда опаснее чужезычных внедрений, ибо подобно вирусам разрушают язык "внутриклеточно". Что же касается компьютерного нашествия извне – после второй мировой, то это, наверное, естественное проявление интернационализации цивилизации, и вряд ли своевременное национальное преуспевание в информатике могло бы этот процесс предотвратить. Вообще проблема сохранения самобытности языка, по-видимому, не решается методами "директивной терапии" – по своему смыслу она социальна, и естественным образом сопрягается с "голосами сознания" (И. Бродский) общества. Так называемая неформативная лексика, "криминализируемая национальным опытом" (снова И. Бродский), возможно, оказала заметную подмогу удержанию своеобразия русского языка. А уж по этой части наши властители обладали, по меньшей мере, способностями к невоспрепятствованию.

мышления, к обеднению мыслей из-за привязанности к одному и тому же "словесному грунту", истощаемому от однородной эксплуатации.

Конечно, любые рациональные и логически организованные утверждения переносятся с одного языка на другой без потерь и вольных трактовок, но путь к ним, зачастую проходящий через догадки и случайные перескоки, через ассоциативные метафоры и даже через наваждения, всегда (ну, почти всегда!) не независим от языка. Так уж устроен наш мыслительный аппарат, попросту говоря, – мозг человека, что его логическая "левополушарная продукция" недостижима (а некоторые считают, что и непостижима!?) без "правополушарной деятельности" – образной, художественной, иррациональной, с загадочными "инсайтными вмешательствами".

А это означает, что нельзя терять ни малейшей возможности изложения на языке своего родного думанья любых произведений, содержащих рассказы о жизни и творчестве людей науки, не говоря уже об их собственных повествованиях. Знакомство с переводами текстов самих классиков и текстов о классиках науки полезно, помимо всего прочего, еще и для межязыковых сопоставлений методов поиска, разведки, звучаний "внутренних голосов". Да и вообще полезно – просто для самосовершенствования мыслительных умений.

Такое вступление похоже скорее на крик души, чем на тихое причитание. Возможно, оно существенно общее наших конкретных намерений. Однако и на общие высказывания, припрятанные в укромных уголках, могут случайно натолкнуться даже "читатели особого предназначения", от которых что-то зависит в этом мире, – натолкнуться и исполниться желанием этим общим высказываниям дать ход и выход.

Для нас же самих эти раздумья были необходимы в качестве аргументов принятия решения по публикации представляемых далее материалов.

В августе 1992 года неожиданно умер Михаил Львович Левин. В оставшихся после него бумагах мы обнаружили перевод биографии Максвелла, написанной проф. У. Нивеном (W. Niven) для двухтомника максвелловских трудов (THE SCIENTIFIC PAPERS OF JAMES CLERK MAXWELL, ed. by W. D. Niven, Paris, Libraire Scientifique J. Hermann, 1927). В свое время М. Л. Левин предполагал предварить этим переводом русское издание "Трактата", но почему-то этого не случилось. Скорее всего, он раздумал из-за внезапной "гонки успевания к сроку", которую устроило нам издательство без предварительного предупреждения, ибо наши договорные сроки минули много лет до

* "Фотографическое издание" (new photographic edition) с первого издания, выпущенного Cambridge University Press в 1890 г.

того. А М. Л. Левин, видимо, считал, что еще не довел свой перевод до состояния, совместимого с собственным представлением о завершенности. Когда же мы ознакомились с этим переводом, то были приятно удивлены его необычностью, возможно как раз и обусловленной недоотредактированностью текста. Перевод весьма *примечателен*, – он более похож на художественный *пересказ*, чем на буквальное следование оригиналу. В музыке, кажется, это называется парафразами на тему. Разумеется, все исполнено в нем с сохранением точности событий, их оценок и той внимательной любви, которую У. Нивен испытывал к Максвеллу. Именно все это побудило нас опубликовать русское изложение нивенской версии биографии Максвелла отдельной брошюрой, как бы вдогонку нашему русскому изданию "Трактата" (Джеймс Клерк Максвелл. "Трактат об Электричестве и Магнетизме". В 2 т. Пер. с англ. М.: Наука, 1989).

Последнее было предпринято уже на рубеже перестройки и, следовательно, очень скаредным тиражом (3100 экз.). И мы уверены, что никакие разумные доводы, включая доказательства прямой выгоды, не приведут к появлению следующего издания, хотя такое пожелание и высказывалось в официальных рецензиях. В одной из них, кстати говоря, присутствовал интересный компромиссный совет – опубликовать отдельно "Послесловие" к русскому переводу "Трактата". Однако прямая перепечатка Послесловия по типу "ремейка" выглядела бы странно – в отрыве от самого "Трактата" читателю было бы трудно (а местами просто неинтересно) следить за изложением индивидуальных мук переводчиков. Поэтому мы постарались придать этому тексту некоторую самостоятельность и независимость от "Трактата". В подправленном предьявлении такую компиляцию можно рассматривать как изложение наших взглядов на принципы научного перевода вообще с конкретной демонстрацией применительно к максвелловскому стилю научного повествования и, кроме того, как краткое описание структуры "Трактата" и обсуждение особенностей понимания Максвеллом созданной им электродинамики на последней, заключительной, стадии этого исторического процесса. В таком виде "диада" из биографии Максвелла и обсуждения его вершинного достижения должна оказаться внутренне согласованной и тем способствующей вовлечению читателей в раздумья над ролью "трудолюбивых осенений" и в науке, и в жизни.

М. А. Миллер

У. НИВЕН. ЖИЗНЬ И НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ДЖ. К. МАКСВЕЛЛА*

В переводе М. Л. Левина

Биография Клерка Максвелла была написана профессорами Л. Кемпбеллом (Lewis Campbell) и У. Гарнеттом (Wm. Garnett) с таким мастерством и любовью, что вряд ли к ней можно что-нибудь добавить. Поэтому составление нового подробного жизнеописания выглядело бы самонадеянной попыткой. Но в то же время мемориальное издание сочинений Максвелла не может обойтись без хотя бы беглого очерка его жизни и трудов. Здесь мы вкратце расскажем главные события жизненного пути Клерка Максвелла, отсылая читателя, желающего узнать подробности или постичь социальные корни его характера, к упомянутой книге Кемпбелла и Гарнетта.

Джеймс Клерк Максвелл происходил от Клерков (Clerks) из Пенкивика (Penicuik) в графстве Мидлоттиан (Midlothian), хорошо известного шотландского рода, история которого прослеживается до 16-го столетия. Первый баронет заседал в шотландском парламенте. Его старший сын, человек образованный, был Бароном Казначейства Шотландии. В более поздние времена Джон Клерк Элдинский (John Clerk of Eldin), принадлежавший к тому же роду, считался изобретателем нового способа пролома вражеской линии кораблей в морском бою, того самого маневра, с помощью которого лорд Родни (Rodney) одержал победу над французами в сражении 1792 года. Следующий Джон Клерк, сын морского тактика, был хитроумным законником и стал впоследствии Лордом Сессионного Суда. Он был знаменит в Эдинбурге своим живым и саркастическим остроумием.

* Фактическое содержание этого Собрания трудов приведено в конце биографического очерка Нивена. Некоторые из перечисленных там работ Максвелла были изданы на русском языке в разные времена, но сейчас нам, живущим в "стране переходных состояний" (известно откуда, но неизвестно - куда), невозможно даже подумать, что когда-нибудь все труды Максвелла будут переведены на русский язык, так что принимаем пока этот перечень к сведению (*Прим. ред.*).

Отцом героя нашего очерка был Джон, брат сэра Джорджа Клерка из Пениквика (Sir George Clerk of Penicuik). Фамилию Максвелл (Maxwell) он принял, получив в наследство имение в Киркдабрайтшире (Kirkcudbrightshire), вошедшее в род Клерков через брак с мисс Максвелл. Нельзя сказать, что он обладал энергией и деятельным умом, ведущими к успеху и отличиям. Скорее он был беспечным, но проницательным и умным человеком, отличительными характеристиками которого были полная искренность и предельная благожелательность. Просвещенный интерес к механическим устройствам и научным занятиям сочетались в нем с практическим складом ума. По окончании университета он посвятил себя юриспруденции и вступил в шотландскую коллегию адвокатов. Но, по-видимому, не достиг большого успеха на этом поприще. Во всяком случае, спокойная жизнь в деревне была настолько привлекательна и для его жены, и для него самого, что он с легкостью распростился с адвокатской карьерой. Жена его Френсез, дочь Роберта Кея (Robert Kay) из Северного Чарльтона в Нортумберленде (Northumberland), отличалась здравым смыслом и решительным характером.

Деревенский дом, где они поселились, оставив Эдинбург (Edinburgh), был построен в имении Джона Клерка Максвелла по его собственному проекту. Дом этот, получивший имя Гленлейр (Glenlair), был окружен красивой местностью, главным очарованием которой были воды реки Урр (Urr) с ее скалистыми и лесными берегами.

Джеймс родился 13 июня 1831 года в Эдинбурге, но большая часть его детства прошла в Гленлейре. Здесь в прелестной и здоровой обстановке малыш стал выносливым и смелым мальчиком. Хотя не слишком охочий до книг, он выказывал задатки будущей духовной силы, проявлявшиеся в стремлении постичь причины и связи окружающих явлений. Впоследствии, когда он уже прославился, стали вспоминать, что вопросы, задаваемые ребенком, отличались глубокомысленностью, необычной для его возраста.

Десяти лет от роду Джеймс, уже потерявший мать, был отвезен в Эдинбург, под присмотр родственников, с тем чтобы он мог учиться в Эдинбургской Академии. В повествовании¹ профессора Кемпбелла, который был однокашником Максвелла в школе, а потом близким другом и постоянным корреспондентом, дано прекрасное описание его школьных лет. Малыш — отец мужчины, и те, кому повезло знать взрослого Максвелла, легко увидят знакомое в кемпбелловском портрете мальчика, переступившего порог школы: домотканая одежда — скорее удобная, чем модная; деревенские обороты речи и забавно причудливая, однако часто с юмором, манера выражать свои мысли; изумление при первой встрече со школьной рутинной и спартанская выдержка во время бурсацких испытаний, выпадающих на долю новичка.

А затем они оценят, насколько верен этот рисунок мальчика, привыкающего к новому окружению и быстро занявшего то место в школе, на которое ему дает право мощь ума, в то время как его избыточная энергия находит выход в изготовлении механических устройств, в геометрических построениях, в чтении и даже в попытках набить руку в сочинении баллад, в письмах к отцу, щедро изукрашенных гротескными рисунками и росписью полей.

Одно событие, относящееся к школьному времени, следует отметить особо – изобретение механического способа построения некоторых классов овалов. Описание этого способа было напечатано в трудах Эдинбургского Королевского Общества – первая работа в настоящем Собрании. Она была доложена Обществу знаменитым профессором Джеймсом Форбсом (James Forbes), который с самого начала проявлял интерес к успехам Максвелла. Профессор Тэт (Tait), другой его одноклассник, замечает, что ко времени написания статьи об овалах Максвелл был обучен лишь алгебре и начаткам Евклида.

В 1847 году Максвелл поступил в Эдинбургский Университет и проучился там три года. Он посещал лекции Келланда (Kelland) по математике, Форбса по натуральной философии (физике), Грегори (Gregory) по химии, Сэра У. Гамильтона (Sir W. Hamilton) по умственной философии (Mental Philosophy), Вилсона (Cristopher North Wilson) по философии нравственности (Moral Philosophy). Лекции Сэра У. Гамильтона оставили в нем глубокий отпечаток, стимулировав любовь к размышлениям, к чему у него всегда была склонность. Однако, как и следовало ожидать, львиная доля его привязанности досталась профессору натуральной философии. Отличавший Форбса энтузиазм естественно вдохновлял юных и ревностных последователей, возбуждал чувство личной причастности. А сам профессор испытывал особый интерес к Максвеллу и предоставил ему необычную тогда привилегию работать на своей аппаратуре.

Внимательное чтение статьи Максвелла об упругих твердых телах, относящейся как раз к этому времени, позволяет установить суть его первой экспериментальной работы. В этой статье дано описание некоторых экспериментов, имеющих целью проверку выводов его теории применительно к оптике. Толчком к изучению этого вопроса послужил, по-видимому, следующий случай. Вместе со своим дядей Джоном Кеем Максвелл посетил Уильяма Николя (William Nicol), изобретателя поляризационной призмы, носящей его имя, который показал ему цвета неотпущенного стекла в полярископе. Это побудило Максвелла изучить законы поляризованного света и соорудить свой грубый полярископ, в котором поляризатором и анализатором были простые стеклянные отражатели. С помощью этого инструмента он получил цветные полосы от неотпущенного стекла, перенес их акварельными крас-

ками на бумагу и послал Николю. Приятно знать, что эти первые юношеские опыты были тепло одобрены Николею: он ободрил и порадовал Максвелла, послав ему в подарок пару своих призм.

Статья, о которой шла речь, называлась: "О равновесии упругих твердых тел". Она была доложена на заседании Эдинбургского Королевского Общества в 1850 году и явилась третьей по счету работой Максвелла, представленной Обществу. Первой – в 1846 году – была уже упомянутая статья об овалах. Вторая, представленная в 1849 году Келландом (Kelland), называлась "Теория катящихся кривых".

Эти достижения девятнадцатилетнего юноши с очевидностью свидетельствовали и о его редкой оригинальности, и о необычайной энергии в преодолении трудностей. Однако свойственная ему сосредоточенность проявилась и в стремлении к одиночеству. Отсюда и особенность его речи и поведения. Он был застенчив и сдержан с незнакомыми, его высказывания часто казались темными и по смыслу, и по способу выражения из-за неожиданных и отдаленных намеков. Общительный в душе и даже любящий быть на людях, он казался сдержанным и скрытным. Кемпбелл жалеет, что пребывание Максвелла в Кембридже не началось раньше, ибо там ему не удалось бы избежать повседневного общения с людьми. Но тогда он, потеряв возможность работать на аппаратуре профессора Форбса, лишился бы, может быть, самой важной части своего научного воспитания.

Поначалу предполагалось, что Максвелл пойдет по стопам отца-адвоката, но очень скоро стало ясно, что его интересует только наука. Поэтому в конце концов был выбран Кембридж, и в октябре 1850 года Питерхаус (Peterhouse) стал местом пребывания Максвелла. Однако всего лишь на один Михайлов триместр (*Michaelmas Term*): 14 декабря того же года он перевелся в Тринити-колледж (Trinity College).

Его подготовка к кембриджскому курсу, конечно, сильно отличалась от обычной; в первое время не было жесткого плана учебы, и он постигал науку по своей воле, оставляя себе возможность предаваться и другим занятиям. Он не был охотником – более того, так называемый спорт всегда вызывал у него отвращение, но сельский образ жизни ему очень нравился. Он хорошо ездил верхом и плавал. Кемпбелл рассказывает, с каким жаром он декламировал стихи Бернса о том, как вдохновение настигает поэта, когда он бесцельно, по воле прихоти бродит вдоль берегов ручья. Из этого рассказа видно, что было самым большим наслаждением для Максвелла. Но он не только любил поэзию. Приводимые Кемпбеллом отрывки его стихов убеждают, что Максвелл сам был поэтом. Однако он ясно понимал, что его истинное призвание – наука, и относился к своим стихотворным опытам, как к простой забаве. Преданность науке, уже поощренная первыми успехами, склонность размышлять над философскими вопросами и привязанность к

английской словесности, в первую очередь к английской поэзии, – все это, заложенное в интеллект удивительной мощи и чистоты, и явилось, можно сказать, первичным запасом, с которым Максвелл начал свою кембриджскую карьеру. Кроме того, он был достаточно и разнообразно начитан в науке, о чем свидетельствуют упомянутые выше статьи для Эдинбургского Королевского Общества. Он привез с собой, как заметил профессор Тэт, кучу знаний, просто непомерную для столь молодого человека, но их беспорядочность приводила в ужас его методичного Тьютора.

В студенческой карьере Максвелла не было ничего особо примечательного. Собственные размышления и поиски ему пришлось отложить в сторону ради систематической учебы. Но ум его неуклонно созрел для будущих трудов. Среди тех, с кем сводило его каждодневно положение студента Тринити-колледжа, были самые яркие и образованные молодые люди университета. В сердечном товариществе стола стипендиатов пришелся ко двору мягкий юмор Максвелла, а в более избранном Клубе Апостолов, созданном для взаимного совершенствования, он нашел место, где его любовь к размышлениям могла проявиться в сочинениях о предметах, лежащих за пределами обычного университетского курса. Работа над этими сочинениями без сомнения заложила основу той литературной законченности стиля, которая столь характерна для всех научных писаний Максвелла. Его биографы собрали выдержки из этих сочинений на разные темы. Они примечательны и глубиной мысли, и иногда встречающимися эпиграммами, полными холодного и саркастического ума.

Все это позволяет нам полагать, что при всей своей застенчивости Максвелл знал себе цену. Тому подтверждение – рассказ покойного Мастера Тринити-колледжа доктора Томпсона (Thompson), к которому, как к тогдашнему Тьютору, Максвелл обратился с просьбой о переводе в этот колледж. Он выглядел застенчивым и неуверенным в себе юнцом, но вдруг, к удивлению Томпсона, вытащил связку статей, несомненно тех, о которых мы уже упоминали, и сказал: "Может быть, это убедит Вас, что я гожусь для вашего колледжа".

Он стал учеником прославленного Уильяма Хопкинса (William Hopkins) из Питерхауса, который приучил его к систематическим занятиям. Одна его особенность запомнилась всем современникам Максвелла. Он всегда пытался решить задачу геометрическим методом, если даже аналитический подход, выбираемый другими учениками, был более легким. Эта черта может быть проиллюстрирована множеством примеров из его сочинений, но она была лишь этапом в его методе решения научных задач, позволяющем переходить от одной идеи к другой без опоры на уравнения.

Студенческие публикации Максвелла на математические темы малочисленны и не имели особого значения. Но ему удалось выкроить время на занятия, выходящие за рамки университетской программы. Он регулярно посещал лекции профессора Стокса (Stokes). На самом деле он был знаком с некоторыми сочинениями Стокса еще до поступления в Кембридж, как это было видно из статьи об упругих твердых телах. Еще до 1850 года Стокс опубликовал замечательные работы по гидромеханике и оптике. Сэр У. Томсон (Sir W. Thomson), который по университетскому счету (by University standing) был старше Максвелла на девять лет, наряду с другими важными исследованиями обратил особое внимание на математическую аналогию между теплопроводностью и электростатикой. Нет никакого сомнения, что эти авторы вместе с Фарадеем, чьи экспериментальные исследования Максвелл тщательно изучал, оказали на него направляющее влияние.

Студенческая жизнь Максвелла кончилась в январе 1854 года. Он был вторым рэнглером, но поделил с Раусом (Routh) (старшим рэнглером этого года) первую награду Смита (First Smith's Prize). Как положено, его выбрали членом Тринити-колледжа, а затем зачислили в штат лектором.

Едва успев освободиться от экзаменационных тягот, Максвелл с головой окунулся в самостоятельную работу. Ему не терпелось заняться несколькими задачами, и в первую очередь он закончил исследование чисто геометрической задачи о трансформации поверхностей при изгибании. Уже в марте мемуар на эту тему был предоставлен в Кембриджское Философское Общество. В это же время он занялся количественным измерением смеси цветов и исследованием причин цветовой слепоты. Как уже упоминалось, еще в студенческие годы он нашел время для изучения электричества. Оно принесло плоды, и в результате появился первый из его замечательных мемуаров на эту тему – мемуар о фарадеевских силовых линиях.

И число и важность его статей, опубликованных в 1855–1856 годах, свидетельствуют о его неутомимости в этот период. А к этому надо добавить еще подготовку лекций в Колледже, чем он занялся с наименьшим энтузиазмом. Завязались ценные знакомства, и много научных и литературных интересов привязывали Максвелла к университету. Тем не менее он выдвинул свою кандидатуру на занятие вакантной кафедры естественной философии Маришаль-колледжа (Marischal College) в Абердине (Aberdeen). Этот шаг был, по-видимому, сыновним уважением желаний отца, ибо длинные летние каникулы в шотландском кол-

* Wrangler – студент, особо отличившийся на экзамене по математике в Кембридже. Используемые в переводе сочетания “старший рэнглер” (senior wrangler) и “второй рэнглер” (second wrangler) следует понимать как первый и второй призеры (лауреаты) на экзамене по математике соответствующего выпуска в Кембридже (*Прим. ред.*).

ледже позволяли ему проводить вместе с отцом почти полгода в Гленлейре. Он получил эту кафедру, но, к несчастью, добрые намерения, побудившие его искать это место, оказались напрасными из-за смерти отца в апреле 1856 года.

Сама по себе замена должности лектора в Тринити на профессорство в Абердине вряд ли была разумной. Некоторый выигрыш, конечно, был – обладание лабораторией и длинные, без перерыва, летние каникулы. Но тяготы обучения началам механики и физики в классах, состоящих из неподготовленных юнцов, вряд ли было подходящим делом для Максвелла, в то время как в большом колледже, подобном Тринити, среди студентов не было недостатка в многообещающих молодых математиках, способных оценить его необычайный талант и глубокие знания. И от обучения таких студентов он и сам был бы в выигрыше.

В 1856 году Максвелл приступил к обязанностям профессора естественной философии Маришаль-колледжа, а спустя два года женился на Кэтрин Мери Дьюар (Katharine Mary Dewar), дочери главы колледжа. Поэтому он выбыл из числа членов Тринити-колледжа, хотя впоследствии вместе с профессором Кэли (Cauley) был избран почетным членом.

В 1856–1860 годах Максвелл активно продолжал изучение цветовых ощущений и изобрел новый измерительный прибор – так называемый цветовой ящик. Но большая часть и его усилий, и времени была отдана исследованию устойчивости колец Сатурна. Тема эта была предложена на соискание премии Адамса (Adams Prize Essay) 1857 года в следующей формулировке:

"Задача должна рассматриваться в предположении, что система колец в точности или с очень большим приближением концентрична с Сатурном и симметрично расположена относительно его экваториальной плоскости. Возможны следующие предположения: (1) кольца являются жесткими образованиями, (2) они жидкие или часть из них газообразна, (3) они состоят из неупорядоченных отдельных масс вещества. Задача будет считаться решенной, если для всех трех гипотез удастся дать ответ о выполнении условий механической устойчивости при взаимном притяжении и движении планеты и колец".

"Желательно также, чтобы была сделана попытка выяснить, какая из перечисленных гипотез в состоянии объяснить наблюдаемый вид и ярких колец, и недавно открытого темного кольца. Далее, желательно указать причины изменения формы колец, найденного из сравнения нынешних наблюдений с более ранними".

Здесь мы отметим лишь, что Максвелл, выполнив громадный объем теоретических исследований, пришел к выводу: "Кольца могут существовать только как система большого числа несвязанных частиц, вращающихся вокруг планеты с разными скоростями, соответствующими их расстоянию от планеты. Эти частицы могут быть упорядочены в виде ряда узких колец, или же каждая из них может беспорядочно пронизывать толщу остальных. В первом случае разрушение всей системы происходит чрезвычайно медленно. Во втором случае оно гораздо быстрее, но может появиться тенденция к формированию узких колец, и процесс замедляется".

Раздел работы, посвященный осцилляторным волнам, возникающим в кольце спутников, иллюстрировался хитроумным механическим устройством, которое было показано Эдинбургскому Королевскому Обществу и вызвало там восхищение.

Это сочинение не только завоевало премию Адамса, но и принесло его автору славу среди людей науки. Сэр Джордж Эйри (George Airy) считал его одним из самых замечательных приложений математики к физике.

Некоторые полагают, что внешняя правильность и однородность колец Сатурна, состоящих из частиц с неупорядоченными движениями, навели Максвелла на исследования по кинетической теории газов, первое из которых было доложено Британской Ассоциации в 1859 году. Может быть, оно и так, но не следует забывать, что к этому времени старая теория Бернулли (Bernoulli) начала вторую жизнь в работах Герапата (Herapath), Джоуля (Joule) и Клаузиуса (Clausius), и они-то и могли привлечь внимание Максвелла.

В 1860 году произошло объединение Кингс-колледжа и Маришель-колледжа в Абердинский университет. Образованную в нем новую кафедру естественной философии возглавил Дэвид Томсон (David Thomson), ранее профессор Кингс-колледжа, по возрасту старше Максвелла. Конечно, Максвелл превосходил его как физик, но зато профессор Д. Томсон обладал исключительными волевыми качествами и административными способностями: именно ему принадлежала решающая роль в слиянии колледжей. Он был также обожаемым лектором и преподавателем и своей деятельностью значительно способствовал повышению уровня научного образования на севере Шотландии. Таким образом, почти неизбежный выбор попечителей университета мог произвести впечатление педагогического провала Максвелла. Совершенно безосновательное однако – судя по числу добровольных слушателей, посещавших его лекции в последний семестр в колледже, он был популярен и как профессор, и как личность.

Об этом свидетельствует также и последовавшее вскоре его избрание профессором естественной философии и астрономии в лондонском

Кингс-колледже (King's College). Новое назначение сблизило Максвелла с товарищами по науке, и в первую очередь с Фарадеем, с чьими исследованиями по электричеству так тесно были связаны его собственные. В 1862–1863 годах он принял активное участие в организованных Комитетом Британской Ассоциации опытах по определению электрического сопротивления в абсолютных единицах и в постановке электрических измерений на должном уровне. По общему плану, предложенному Сэром Уильямом Томсоном, в лаборатории Кингс-колледжа были выполнены две большие серии экспериментов. В первый год рабочими участниками этих опытов были Максвелл, Бальфур Стюарт (Balfour Stewart) и Флиминг Дженкин (Fleeming Jenkin), на следующий год Бальфура Стюарта сменил Чарльз Хокин (Charles Hoskin). Плоды работы Комитета были сообщены в форме отчетов Британской Ассоциации, а впоследствии составили целый том, опубликованный Флимингом Дженкином.

Максвелл был профессором Кингс-колледжа с 1860 по 1865 год, и именно на этот период приходятся самые важные из его работ. Второй мемуар о Цветах появился в 1860 году. В том же году были опубликованы его первые статьи по Кинетической Теории Газов. В 1861 году вышли статьи о Физических Силовых Линиях, а в 1864 – величественный мемуар по электричеству – Динамическая Теория Электромагнитного Поля. Но Динамическая Теория Газов занимала его и в 1865 году, ибо вскоре были опубликованы две важные статьи: сначала Бекерианская лекция о вязкости газов, а затем мемуар о Динамической Теории Газов.

Умственное напряжение, связанное с такой обширной деятельностью в науке, сопряженной с одновременными обязанностями профессора, которым приходилось уделять 9 месяцев каждого года, явилось, по-видимому, причиной принятого им в 1865 году решения об отказе от кафедры. Максвелл уехал в свое поместье. Вскоре после этого он перенес тяжелую болезнь, а по выздоровлении продолжил работу по Динамической Теории Газов, которую мы уже упоминали. Спокойно и уединенно прошли несколько лет жизни в Гленлейре, лишь раз в год приезжал он в Лондон для участия в собраниях Британской Ассоциации, да еще в 1867 году совершил поездку в Италию. Правда, несколько раз он соглашался быть экзаменатором на математических Трайпосах в Кембридже, и на это уходили две-три зимние недели в университете. Главным же занятием Максвелла все эти годы была подготовка знаменитого ныне Трактата об Электричестве и Магнетизме, который был опубликован лишь в 1873 году. Кроме этого Максвелл написал книгу о Теплоте; она вышла в свет в 1871 году.

В 1871 году Максвелл вышел – надо сказать, с неохотой – из своего деревенского отшельничества. Наступил новый этап его жизни. Неза-

долго до этого Кембриджский университет принял решение создать кафедру физики для развития исследований и обучения в области Теплоты, Электричества и Магнетизма. Поощряя эту цель, Канцлер университета Герцог Девонширский великодушно дал средства на строительство лаборатории и оборудование ее всеми необходимыми приборами. Максвелл получил приглашение занять эту новую кафедру и вместе с тем следить за сооружением лаборатории. В октябре 1871 года он прочитал свою вступительную лекцию.

Строительство Кавендишевской лаборатории, названной так в честь ее основателя, нынешнего главы рода, давшего миру великого физика с той же фамилией, было закончено в 1874 году. В июне этого года Канцлер официально подарил ее университету. Благодаря усилиям Максвелла и само здание, и оборудование в комнатах были великолепны, однако общее число приборов оказалось меньшим по сравнению с намерениями Канцлера. Так получилось из-за того, что Профессор заказывал приборы лишь у самых лучших мастеров и при этом еще вносил придуманные им самим усовершенствования. Со временем этот недостаток был в значительной степени устранен, поскольку по мере надобности постоянно добавлялись новые приборы.

Одной из главных целей Максвелла было руководство занятиями молодых бакалавров, ставших его учениками после успешной сдачи университетских экзаменов. Несколько учеников, ныне достигших известности, проводили важные опыты под руководством самого профессора. Надо признать, что сначала число их было невелико, но, возможно, здесь сказывались традиции многих прежних лет. Отношение Профессора к этим ученикам отличалось исключительной добротой и стремлением помочь. В долгих беседах он открывал перед ними кладовые своего ума, подсказывал, чем стоило бы заняться и чего следует избегать, и всегда находил хитроумные выходы из экспериментальных трудностей, ставящих их в тупик. Эти беседы, всегда блестящие и поучительные, являлись сами по себе, как вспоминал один из учеников, щедрой образовательной школой. И слушатели платили ему благодарной привязанностью, редко выпадавшей на долю других учителей.

Кроме руководства собственной кафедрой, Максвелл принимал активное участие в делах университета, и в частности отлаживал лекционные курсы по математике и физике.

В течение ряда лет, предшествующих возвращению Максвелла в 1866 году в Кембридж в качестве экзаменатора на математических Трайпосах, занятия в Университете постепенно утрачивали связь с великими научными событиями, происходившими снаружи его стен. Поговаривали, что бывшие тогда в ходу темы не представляют интереса для молодого поколения. Поднялся ропот, что из-за отсутствия таких важных разделов, как "Теплота", "Электричество" и "Магнетизм" в

экзаменационных задачах Трайпоса кандидаты тратили время и усилия на математические безделушки, лишённые научного интереса и практической ценности. Максвелл с жаром включился в перестройку. Его задачи, предложенные в 1866 году и в последующие годы, вдохнули новую жизнь в экзамены, он принял самое активное участие в разработке нового учебного плана в 1873 году, но, конечно, наибольшее влияние он оказал на молодых членов университета своими сочинениями, и сыграл в значительной степени определяющую роль во введении осуществлённых перемен.

Первые два года в Кембридже Максвелл был занят и окончательной отделкой своего великого труда об Электричестве и Магнетизме. После хлопот с напечатанием он вышел в свет в 1873 году, и немногие опубликованные за эти два года статьи Максвелла касаются в основном вопросов, составляющих содержание Трактата. Так что действительно ему уделялось почти все внимание Максвелла в этот период. После опубликования Трактата число статей Максвелла в научных журналах заметно увеличилось, наиболее важные из них относились к Динамической Теории Газов. Кроме этого, он написал множество заметок и обзоров для журнала Нейчур и для Британской Энциклопедии. Тут и прелестные изложения научных вопросов и критические разборы работ современных авторов и, наконец, краткие уважительные биографии товарищей по науке.

Очень много времени и труда потратил он, правда с большой охотой, на редактирование "Электрических Исследований" достопочтенного Генри Кавендиша (Hon. Henry Cavendish). Этот труд, опубликованный в 1879 году, значительно увеличил репутацию Кавендиша, открыв многие достижения, о которых и не подозревали, этого проницательного физика в Теории Электричества, особенно в измерении электрических величин. Издание это обогащено рядом ценных примечаний, в которых воззрения и результаты Кавендиша разобраны с позиций современных теорий и методов. Особенно ценны методы нахождения электрических емкостей проводников и конденсаторов – предмет, в котором проявилось искусство Кавендиша и как математика, и как экспериментатора.

Значение взятого Максвеллом на себя труда по обработке бумаг Кавендиша можно понять из следующего отрывка предисловия к их изданию.

"Трудно объяснить тот факт, что, хотя Кавендиш составил полное описание своих опытов с заряженными телами и даже не поленился переписать его набело, хотя все это было сделано до 1774 года, опыты по электричеству продолжались до 1781 года, а прожил он до 1810 года – рукопись так и не была опубликована".

“Кавендиша интересовало само исследование, а не публикация. Он пускался в напряженные поиски для прояснения трудности, которую никто кроме него самого не мог углядеть, и нет никакого сомнения, что исход этих поисков приносил ему в случае успеха некое удовлетворение. Но оно не пробуждало в нем желания сообщить об открытии другим, желания, которое для обыкновенных людей науки является причиной публикации их результатов. Писанная история электричества показывает, что исследования Кавендиша остались полностью неизвестными для людей науки”.

Вероятно, любому человеку ясно, насколько трудно поставить себя на место физика, жившего столетием раньше, и прочувствовать подлинную суть его опытов. А Максвелл сделал это с таким воодушевлением, что как бы изнутри полностью овладел кавендишевскими подходами. И доказал, что Кавендиш предвосхитил многие открытия в науке об Электричестве, сделанные много лет спустя. Именно ему принадлежат введение понятий и измерение электрической емкости и диэлектрической проницаемости, он же предвидел и закон Ома (Ohm).

Едва кончив дело с рукописями Кавендиша, Максвелл принялся за подготовку нового издания своего Трактата об Электричестве и Магнетизме. Но, к несчастью, летом 1879 года здоровье его резко ухудшилось. Надеялись, что живительный воздух деревенского дома сможет восстановить его силы. Но летние месяцы не принесли улучшения, и он постепенно стал падать духом. Старший товарищ по университету Профессор Сэндерс (Sanders) сказал, наконец, что ему осталось жить лишь несколько недель.

Еще надеясь на что-то, Максвелла перевезли в октябре обратно в Кембридж, где его пользовал любимый им врач Доктор Паже (Paget). Но ничего не помогало, и после мучительных страданий Максвелл умер пятого ноября 1879 года на 49-м году жизни.

Максвелл был скошен смертью в самом расцвете своих творческих сил – как раз в то время, когда область науки, развитию которой он столь многим способствовал, каждый день обогащалась свежими открытиями. Его смерть оплакивалась, как невосполнимая потеря для Науки и для Университета, ценившего его расположение и восхищавшегося его гениальностью.

Мы не будем обсуждать здесь в подробностях историческую связь деятельности Максвелла и его предшественников, равно как и его воздействие на научную мысль наших дней. В ряде его статей содержатся обширные ссылки на труды тех, чье влияние он испытал, а в самых его поздних статьях, особенно в популярных, написанных для Британской

Энциклопедии, он дал полное историческое описание главнейших разделов науки, в которых он трудился. И не наступило еще, как нам кажется, то время, когда можно должным образом оценить все возрастающее влияние идей Максвелла на современную научную мысль. Поэтому мы ограничимся здесь лишь напоминающим перечнем самых главных достижений Максвелла.

Его сочинения расположены, насколько это возможно, в хронологическом порядке. Но естественно разбить их по нескольким заголовкам, и мы вряд ли ошибемся, если поставим на первое место труды по Электричеству.

Первая статья Максвелла на эту тему носила название "О фарадеевских силовых линиях" и была доложена Кембриджскому Философскому Обществу 11 декабря 1855 года. Его давно привлекал подход Фарадея к описанию законов электричества, и здесь он поставил перед собой задачу показать, что идеи, руководившие Фарадеем в его исследованиях, не противоречат формулам, в которых Пуассон и другие выразили эти законы. Целью работы было найти физическую аналогию, которая позволила бы уяснить результаты предшественников, "не отдавая себя в плен какой-либо теории, доставившей нам исходные физические понятия. Тогда погоня за аналитическими тонкостями не уведет нас в сторону от сути дела, а выбор гипотезы не приведет к уклонению от истины".

Далее электрические законы сравниваются со свойствами несжимаемой жидкости, движение которой замедляется силой, пропорциональной скорости, причем сама жидкость не обладает инерцией. Максвелл указывает аналогию между линиями тока такой жидкости и силовыми линиями и получает таким образом не только законы статического электричества в однородной среде, но и способ описания перехода действия из одного диэлектрика в другой.

В заключительной части статьи он переходит к разбору явлений электромагнетизма и показывает, что законы, открытые Ампером и Фарадеем, приводят к одинаковым выводам. В этой же работе он дает три выражения, описывающие компоненты фарадеевского электротонического состояния, признавая, однако, что пока еще не может сформулировать физическую теорию, приводящую к ясной картине связей, выражаемых этими уравнениями.

Важность этой работы прежде всего в том, что она высвечивает те принципы, которыми руководствовался Максвелл с самого начала своих исследований по электричеству. Идея электротонического состояния прочно овладела его умом еще до того, как он смог дать ей физическое объяснение. В статье "О физических линиях силы", напечатанной в 21-м томе Философского Журнала, Максвелл снова возвращается к этому предмету. Он объясняет, что в своей предыдущей статье

он нашел геометрическое толкование электротонического состояния, а теперь намерен "рассмотреть магнитные явления с точки зрения механики". Тут же выдвигается замечательное предложение о магнитном поле, занятом молекулярными вихрями, оси которых направлены вдоль силовых линий. Предполагается, что ячейки, внутри которых крутятся эти вихри, разделены слоями частиц, выполняющих двойное назначение. Они передают движение от одной ячейки к другой, а своими собственными движениями создают электрический ток. Эта теория, породившая несколько рабочих моделей, придуманных для объяснения явлений в диэлектрике, замечательна и детальной разработкой и, главное, тем, что она объясняет не только магнитные и электромагнитные действия, но и различные виды электростатического действия. Впоследствии, создав общую теорию Электромагнитного Поля, Максвелл отнюдь не следовал всем соображениям этой статьи, но нет никакого сомнения, что главные ее мысли, и в первую очередь существование вращения вокруг магнитных силовых линий, принадлежали к числу его постоянных убеждений. В "Трактате об Электричестве и Магнетизме" (т. II с. 416, во втором издании с. 427*) после ссылки на объяснение магнитного вращения плоскости поляризации света, данное Сэрмом У. Томсоном, идут такие слова об указанной статье:

"Теория молекулярных вихрей, разработанная мною с достаточною обстоятельностью, была опубликована в Философском журнале в выпусках за март, апрель и май 1861 года и за январь и февраль 1862 года".

"Я полагаю, что у нас есть свидетельства в пользу мнения о существовании некоего явления вращения, происходящего в магнитном поле, что это явление совершается большим числом очень маленьких частиц вещества, каждая из которых крутится вокруг собственной оси, что эти оси параллельны направлению магнитной силы и что вращения различных вихрей связаны между собой некоторым механизмом".

"Сделанную затем попытку вообразить рабочую модель такого механизма надлежит рассматривать не более как только демонстрацию того, что можно придумать механизм, способный создавать механические связи, эквивалентные истинным связям между частями Электромагнитного Поля".

Эта статья важна и тем, что в ней содержится первое упоминание об Электромагнитной Теории Света, которая затем была подробно развита в третьем большом мемуаре Максвелла "О Динамической Тео-

рии Электромагнитного Поля". Этот мемуар, представленный Королевскому Обществу 27 октября 1864 года, содержит самые зрелые соображения Максвелла о предмете, столь долгое время занимавшем его ум*. Впоследствии он вошел в Трактат с незначительными переделками, не коснувшимися его главного содержания. В этой статье Максвелл переворачивает сам подход к электрическим явлениям, принятый всеми авторами математического толка, которые начинали с законов, найденных Ампером, и, опираясь на закон сохранения энергии, выводили из них индукцию токов. Максвелл же сперва приходил к законам индукции, а затем выводил механические притяжения и отталкивания.

Напомнив об основных явлениях взаимодействия токов и магнитов, индукции, вызываемой в контуре при любых изменениях пронизывающего его поля, распространении света через светонесущую среду, свойствах диэлектриков и других явлениях, указывающих на существование среды, способной передавать силу и движение, Максвелл продолжает:

"Итак, все это ведет нас к представлению о сложном механизме, способном совершать множество разных движений, между которыми существуют такие связи, что движение одной части зависит в силу определенных соотношений от движения других частей, и эти движения сообщаются через силы, возникающие из-за упругости при относительных смещениях связанных между собой частей. Такой механизм должен подчиняться законам Динамики".

Применяя динамический принцип к такой связанной системе, Максвелл пришел к некоторым общим заключениям, которые после сравнения с законами индуцированных токов позволили ему отождествить некоторые черты этого механизма со свойствами токов. Именно так были объяснены и взаимоувязаны индукция токов и их электромагнитное притяжение.

Опираясь на этисылки, Максвелл в том же мемуаре устанавливает общие уравнения Поля и получает известные формулы для механических сил, действующих на токи, магниты и тела, несущие электрический заряд. Далее он возвращается к электромагнитной теории света, разрабатывая ее с большей полнотой. Из его уравнений следует, что

* Именно эта дата, 27 октября 1864 года, может считаться Днем Рождения Максвелловской Электродинамики. Студенты Нижегородского (тогда еще Горьковского) университета очень торжественно отпраздновали столетие этого события. К сожалению, люди редко отдают дань праздникам Естественных Наук, предпочитая им юбилей Гуманитарных (Прим. ред.).

через диэлектрики могут проходить лишь поперечные колебания, скорость распространения которых в воздухе, вычисленная по его электрическим свойствам, практически совпадает со скоростью света. Для других диэлектриков показатель преломления равен квадратному корню из произведения диэлектрической проницаемости на магнитную проницаемость. Впрочем, последний множитель для большинства веществ практически совпадает с единицей. Этот вывод теории подвергался проверке на нескольких сравнениях. Для парафина и некоторых углеводородов теория и эксперимент дают хорошее согласие, однако для стекла и ряда других веществ это не так. Максвелл применяет свою теорию и к средам, не являющимся совершенными изоляторами, и находит выражение для потерь света при прохождении через слой данной толщины. Подтверждение своих результатов он видит в том, что хорошие проводники светонепроницаемы, в то время как изоляторы прозрачны. Но при этом он добавляет, что свободно проводящие ток электролиты часто бывают прозрачными, а сусальное золото, чье сопротивление было определено в опытах Хокина, пропускает слишком большое количество света. И тут он отмечает, что возможно "для электромагнитных сил, меняющих свое направление с такою же быстротой колебаний, как у света, потери энергии меньше, чем в случае, когда они не меняют направление заметное время, как это имеет место в наших опытах". Подобное объяснение может быть дано и расхождению между вычисленными и наблюдаемыми значениями диэлектрических проницаемостей. В 46-м томе Трудов Королевского Общества Профессор Дж. Дж. Томсон (J. J. Thomson) описывает свои опыты по нахождению диэлектрической проницаемости ряда диэлектриков для переменных электрических сил, имеющих частоту 25 000 000 колебаний в секунду. Он нашел, что в этих условиях диэлектрическая проницаемость стекла очень близка к величине квадрата показателя преломления и гораздо меньше значения для малых частот изменения поля. Здесь следует сослаться и на наблюдения Профессора Герца (Hertz), показавшего, что вулканист и смола прозрачны для волн с периодом колебаний около трехсот миллионных долей секунды. Исследования Герца показали, что электродинамические излучения передаются в форме волн, чья скорость, если и не равна скорости света, то сопоставима с ней; тем самым эти исследования окончательно доказали, что удовлетворительная теория электричества обязана опираться в той или иной форме на процессы в диэлектрике. Как он сам подчеркивает в своем Трактате, основной чертой теории является трактовка изменения электрического смещения как части – наряду с током проводимости – полного тока, поток которого подобен несжимаемой жидкости. Именно этот полный ток обуславливает внешние электродинамические действия. В этом отличие теории Максвелла от теории Гельмгольца, также учиты-

вающей влияние диэлектрика. Подробное обсуждение различий между этими двумя теориями дано в написанном профессором Дж. Дж. Томсоном обзоре электрических теорий, к которому мы отсылаем читателя*. Здесь же лишь отметим, что в упомянутом мемуаре Максвелл применяет свою теорию к прохождению света через кристаллы и при этом сразу избавляется от волн с продольными колебаниями, бывших камнем преткновения для других теорий света.

Усилиями Лорда Рэля (Lord Rayleigh), г-на Глейзбрука (Glazebrook), профессора Дж. Дж. Томсона и других исследователей электромагнитная Теория Света была существенно обогащена. И в настоящих Трудах содержатся небольшие статьи, относящиеся к науке об электричестве, хотя, конечно, наиболее полный свод работ Максвелла в этом направлении надо искать в его Трактате об Электричестве и Магнетизме, куда были включены все более ранние результаты.

Другой цикл статей, вряд ли менее значительный, чем статьи об электричестве, образуют мемуары по Динамической Теории Газов. Сама идея, что свойства вещества объясняются движениями и столкновениями предельно малых частиц, столь же стара, как времена древней Греции, и в своей статье "Атомы" Максвелл подробно описал все былые споры, порожденные этой идеей. Однако математические трудности были столь велики, что реальный успех наступил лишь тогда, когда этим занялся Клаузиус и вскоре за ним Максвелл. Первая его статья на эту тему называлась "Пояснения к Динамической Теории Газов" и была опубликована в январском и июльском выпусках Философского Журнала за 1860 год, будучи в предыдущем году доложена на собрании Британской Ассоциации. Хотя развитые в этой статье методы были впоследствии заменены Максвеллом другими, сама статья весьма интересна тем, что в ней ясно очерчен круг задач, которые Максвелл предполагал решить, так что она в зародыше содержит многое из того, что было рассмотрено в его следующем мемуаре. В этом смысле статья начинает эпоху, поскольку в ней впервые перечислены утверждения, характеризующие достижения Максвелла в этой области. В ней впервые говорится о распределении по скоростям в соответствии с законом ошибок. Предвещена теорема о равенстве средних кинетических энергий молекул двух газов, находящихся в тепловом равновесии, и впервые дана динамическая трактовка вязкости газов.

В большом мемуаре "О Динамической Теории Газов", опубликованном в Философских Трудах Королевского Общества и доложенном обществу в мае 1866 года, он возвращается к этому предмету и в первый раз предлагает общие динамические методы, необходимые для его рассмотрения. Казалось бы, Максвелл возделывает ту же почву, что и в

* British Association Report, 1885.

предыдущей статье, однако подходы отличаются очень сильно. Он отказывается от прежней гипотезы о молекулах как о твердых упругих шарах и предполагает теперь, что они отталкиваются друг от друга с силой, обратной пятой степени расстояния. Главной причиной выбора такого закона действия является то, что он существенно упрощает расчет столкновений между молекулами и приводит к прямой пропорциональности между коэффициентом вязкости и абсолютной температурой. Максвелл сам провел экспериментальную проверку этого заключения теории и в статье о Вязкости Газов сообщил об удивительном согласии. Пересчет его вычислений обнаруживает, однако, небрежности, существенно влияющие на полученное значение коэффициента вязкости. Последующие эксперименты также показывают, что простая связь, которую он пытался установить, не столь близка к истине, как он полагал, и поэтому весьма сомнительно, что взаимодействие между двумя молекулами может быть представлено законом простого вида.

В этом же мемуаре дано новое доказательство закона о распределении молекул по скоростям, но оно при всех своих достоинствах опирается на предположение, что в окрестности каждой точки распределение по скоростям одинаково для всех направлений, независимо от воздействий, испытываемых газом. Этот изъян в рассуждении, отмеченный впервые Больцманом (Boltzmann), почувствовал, по-видимому, и сам Максвелл, поскольку впоследствии в статье "О напряжениях в Разреженных Газах, возникающих из-за неравенства Температур", опубликованной в 1-й части Философских Трудов за 1879 год, он выбирает функцию распределения иной формы. Целью этой статьи было построение теории явлений, наблюдаемых в радиометре Крукса (Crookes). Результаты исследования изложены во введении к этой статье, и из них следует, что Динамическая Теория не в состоянии объяснить наблюдаемое движение без предположения о том, что газ, находящийся в контакте с твердым телом, может скользить с конечной скоростью вдоль его поверхности между участками с различной температурой. В приложении к статье он показывает, что при определенных допущениях относительно природы контакта между твердым телом и газом должен быть – при постоянном давлении – поток газа вдоль поверхности от холодных участков к горячим. Последняя из его больших статей на эту тему посвящена Теореме Больцмана. Кроме того, Максвелл написал множество небольших заметок, относящихся к родственным вопросам, опубликованных в основном в Нейчур и Британской Энциклопедии. Некоторые из них содержат более или менее популярное изложение результатов самого Максвелла, в остальных речь идет об исследованиях других авторов. Почти каждая их страница весьма поучительна, и они изобилуют пронизательной критикой тех суждений, с которыми Максвелл не был согласен. Иногда трудно следовать

за мыслью Максвелла в больших статьях, популярные же его сочинения отличаются необычайной ясностью и простотой стиля. Читать их всегда интересно.

Первая из статей Максвелла о Восприятии Цвета взята из Трудов Шотландского Королевского Общества Искусств и имеет вид письма к доктору Уилсону, датированного 4-м января 1855 года. За ней сразу следует сообщение в Эдинбургское Королевское Общество. Этот предмет занимал его внимание еще несколько лет. Наиболее важные из относящихся сюда результатов можно найти в статье "Отчет об опытах по Восприятию Света", опубликованной в XIV томе Философского Журнала, и в статье "О Теории Составных Цветов и их отношении к цветам спектра" в Философских Трудах за 1860 год. Следует отметить и две лекции в Королевском Институте, в которых он с обычной для него ясностью пересматривает и подкрепляет свои точки зрения. С самого начала Максвелл принял Теорию Цветовых ощущений Юнга (Young), согласно которой все цвета в конечном итоге сводятся к трем: красному, зеленому и фиолетовому. Эта теория была возвращена к жизни Гельмгольцем (Helmholtz), подведшим под нее физиологический фундамент. Максвелл же, однако, посвятил свои усилия придумыванию точных способов образования и измерения цветовых смесей. Его первый способ получения смесей, Цветовой Волчок, существовал и раньше, но в руках Максвелла он превратился в инструмент, дающий точные количественные результаты, что позволило менять и измерять количество цветов, смешиваемых в глазе. Для графического представления цвета он, следуя Юнгу, использовал равносторонний треугольник, в вершинах которого располагались основные цвета. Тогда все цвета, включая белый, которые можно было получить смешением в той или иной пропорции основных цветов, представляются точками, лежащими внутри треугольника. Точки же снаружи треугольника представляют цвета, которые, будучи смешанными с одним из основных тонов, дают результат смеси двух остальных или же после смеси с двумя основными могут дать оставшийся третий.

В поздних статьях, особенно в напечатанной в Философских Трудах, Максвелл предпочитает работать с Ящиком Цветов, в котором разные участки спектра можно смешивать в тех или иных пропорциях, а затем согласовывать с белым цветом, соответственно уменьшая его интенсивность. Таким путем получается ряд цветовых уравнений, позволяющий разложить любой цвет по трем основным. Эти наблюдения, на которые Максвелл положил немало труда, до сих пор продолжают оставаться наиболее важными результатами, относящимися к ощущению цвета, и они сохраняют свою ценность независимо от того, какая теория физиологии восприятия цвета будет в конце концов принята.

В связи с этими исследованиями ощущений нормального глаза уместно отметить, что Максвелла занимал и вопрос о цветовой слепоте, который рассмотрен им с достаточной подробностью в его статьях.

Еще одним из предметов, интересовавших Максвелла, была Геометрическая Оптика. Уже в первые годы своего научного пути он начал составлять трактат об Оптике, который, однако, так и не был завершен. Первая его статья в этой области "Об общих законах оптических приборов" появилась в 1858 г., но краткое изложение первой ее части докладывалось раньше Кембриджскому Философскому Обществу. В ней даны условия, которым должен удовлетворять совершенный оптический прибор, и показано, что если для двух положений предмета его изображения совершенны, то есть свободны от астигматизма, искривлений и искажений, то эти изображения будут совершенными для всех расстояний. Опираясь на этот результат, он находит связь между фокусами входящего и выходящего пучков лучей, силу увеличения и другие характерные величины. Вопросы преломления в сложных системах он позже разобрал с помощью иного подхода в трех статьях, сообщенных Лондонскому Математическому обществу. В первой из них (1873) "О фокальных линиях преломленного пучка" он использует характеристическую функцию Гамильтона для определения фокальных линий тонкого пучка при его преломлении из одной изотропной среды в другую для произвольной поверхности раздела. Во второй статье (1874) "О характеристической функции Гамильтона для узкого пучка света" рассмотрена более сложная задача о прохождении луча из одной изотропной среды в другую, когда эти среды разделены третьей произвольной средой. Максвелл находит наиболее общий вид функции Гамильтона двух точек, из которых одна лежит в среде испускания пучка, а другая – в среде входа, причем обе точки близки к главному лучу пучка. Общий результат прилагается затем к двум задачам о нахождении пучка, выходящего (1) из спектроскопа, (2) из оптического прибора, симметричного относительно своей оси. В третьей статье (1875) последняя из упомянутых задач разбирается заново с большей полнотой.

Следует отметить, что все эти статьи объединены одной общей идеей – сперва рассмотреть оптические явления в приборе как нечто целое, не касаясь механизма, осуществляющего эти явления, а уж потом – как в статье 1858 года – использовать конкретные данные о приборе, доставляемые опытом.

С оптическими статьями в некоторой степени связано опубликованное в 1868 году исследование "О циклиде". Как следует из названия, статья эта в основном посвящена геометрическим свойствам указанной поверхности. Но затронуты и другие вопросы, например, о сопряженных с ней изотермических функциях. В первую же очередь исследу-

ются поверхности, ортогональные системе лучей, проходящих через две линии. В сноске к тексту статьи Максвелл описывает изобретенный им стереоскоп, ныне хранящийся в Кавендишской Лаборатории.

В 1868-м была также опубликована короткая, но очень важная статья "О наилучшем устройстве для получения чистого спектра на экране".

Связанную группу образуют статьи, посвященные напряжениям, возникающим под действием сил в участках ферм. Первой из них была "О взаимных фигурах и диаграммах сил", опубликованная в 1864 году. Почти сразу за ней следовала статья на родственную тему "О вычислении равновесия и жесткости ферм". В первой из этих статей Максвелл выводит некоторые соотношения взаимности для двух многоугольников, связанных между собой особым образом, и устанавливает свою хорошо известную в Графостатике теорему о напряжениях в фермах. Во второй он применяет принципы работы к задачам, связанным с напряжениями в фермах и структурах и с отклонениями, вызванными растяжениями каких-либо соединяющих частей.

Тут следует упомянуть третью статью "О равновесии сферической оболочки". В ней рассмотрены напряжения в оболочке, вызванные системой сил, приложенных к поверхности, а также для случая двух нормальных сил, приложенных в двух произвольных точках, причем дано полное решение задачи. Это решение, использующее принцип инверсии, ранее нашедший применение в электростатике, сводит задачу к определению некоторой функции, впервые введенной Сэром Джорджем Эйри. Максвелл назвал ее Функцией Напряжений Эйри. Методы, с таким успехом развитые в этой статье, по-видимому, побудили Максвелла вернуться к своей прежней работе и расширить установленные в ней свойства взаимности. Так появился его четвертый вклад в эту область "О взаимных фигурах, формах и диаграммах сил". Этот важный мемуар был опубликован в Трудах Эдинбургского Королевского Общества, а затем отмечен Премией Кейта (Keith Prize). В начале мемуара содержится удивительно красивый способ построения плоских взаимных диаграмм. Затем обсуждаются геометрия, степени свободы и связи в многогранной ферме, с последующим переходом к предельному случаю, когда грани становятся бесконечно малыми и вместе образуют гладкую поверхность. По ходу изложения Максвелл получает ряд результатов общего характера, относящихся, в частности, к нерастяжимым поверхностям и имеющих практическое значение для анализа нагруженных ферм. Затем он приступает к общей задаче о графическом представлении внутренних напряжений в теле. Опираясь на расширенное толкование "Диаграммы Напряжений", он дает построение диаграммы, обладающей и механическими, и геометрическими свойствами взаимности по отношению к фигуре, находящейся в напряженном со-

стоянии. Нет никакой возможности описать здесь хотя бы кратко все эти свойства взаимности, нахождение которых блестяще демонстрирует мощь максвелловских методов. Отметим лишь, что при выполнении некоторых ограничительных условий эта диаграмма позволяет выразить все составляющие напряжений через единственную функцию, аналогичную функции напряжения Эйри. В заключительных разделах мемуара обсуждаются уравнения напряжений и показывается, что общее решение может быть выражено через три функции, аналогичные функции Эйри для двух измерений. Эти результаты прилагаются к частным случаям. Например, дано полное рассмотрение задачи о напряжениях в горизонтальной балке, равномерно нагруженной вдоль верхней границы.

Мы сочли необходимым обрисовать здесь работы Максвелла в тех разделах физики, в которых число этих работ велико. Однако мы не можем описать на этих страницах всего вклада Максвелла в науку. Но об этом читатель может без особого труда узнать из слов самого Максвелла, ибо он, как правило, во введении к каждой статье давал и ясный обзор положения дел в рассматриваемой проблеме, и краткое изложение полученных им результатов. Укажем только несколько мемуаров, хотя и не связанных с другими статьями, но чрезвычайно интересных сами по себе. Наиболее важным из них, по-видимому, можно считать труд о кольцах Сатурна. Сюда же относятся некоторые статьи по динамике, гидромеханике и чистой математике, внесшие весьма полезный вклад в эти разделы науки.

Оставшиеся смешанные статьи могут быть подразделены на (а) Лекции и Речи, (б) Очерки или небольшие Трактаты, (в) Биографические Заметки, (г) Рецензии и Критические Отзывы.

Класс (а) включает его речи перед Британской Ассоциацией, Лондонским Математическим Обществом, Редевскую Лекцию в Кембридже (Rede Lecture at Cambridge), речь на открытии Кавендишской Лаборатории и лекции в Королевском Институте и в Химическом Обществе.

Класс (б) содержит все заметки (кроме одной), написанные для Британской Энциклопедии, и заметки того же рода в Нейчур.

В класс (в) входят такие статьи, как "Фарадей" из Британской Энциклопедии и "Гельмгольц" из Нейчур.

Наконец, класс (г) в основном состоит из отзывов на недавно опубликованные книги. Они появлялись в Нейчур и наиболее существенные из них перепечатаны здесь.

В некоторых из этих писаний, в частности из класса (б), автор не стесняется ограничениями в математической символике; так, например, статья "Капиллярное Притяжение" есть попросту целый маленький трактат, где вопрос разбирается со всей требуемой математикой. Лекции относятся к одному из разделов Физики, которыми он больше всего занимался – Восприятие Цвета, Действие через Среду, Молеку-

лярная Физика. Ценность их весьма велика. Все эти популярные очерки отличают ясное и стройное изложение принципов, красота в построении текста, сила и точность в доказательствах и выборе примеров. Стиль прост и на редкость свободен от каких-либо туманностей или темнот. Иногда же, например в лекциях, пробивается сдерживаемое красноречие, когда эмоциональная сторона предмета пересиливает рассуждения.

В настоящее собрание не включены книги, написанные или изданные Максвеллом: "Теория Теплоты" (первое издание, 1871 год); "Электричество и Магнетизм" (первое издание, 1873 год); "Исследования по Электричеству достопочтенного Генри Кавендиша, Члена Королевского Общества, написанные между 1771 и 1781 годами, изданные по подлинным рукописям, принадлежащим Герцогу Девонширскому, Рыцарю Подвязки" (1879 год). К ним можно добавить изящное маленькое введение в Динамику под названием "Материя и Движение" (издано в 1876 году Обществом по распространению Христианского Знания). Кроме того, Максвеллу принадлежит раздел в Отчете Британской Ассоциации об Электрических Единицах, изданном впоследствии Флимингом Дженкином в виде книги.

"Теория Теплоты" вышла в серии научных учебников, издаваемой Лонгменсом, Грином и К°. (Longmans, Green and Co.), и сразу же была признана блестящим изложением предмета, часть которого, причем наиболее интересная часть – механическая теория, только начала свое существование, обязанное гению и трудам Ренкина (Rankine), Томсона и Клаузиуса. Особую прелесть трактату Максвелла придает свежесть и новизна изложения, сделавшие книгу столь популярной среди изучающих Теплоту.

Уже после смерти Максвелла, в 1881 году, Профессор Гарнет завершил и выпустил в свет "Начальный Трактат об Электричестве", большую часть которого Максвелл успел написать. Цель этого сочинения и его место по отношению к большому Трактату видны из следующих слов максвелловского предисловия:

"В этой небольшой книжке я сделал попытку по возможности сжато описать явления, проливающие свет на теорию электричества, и с их помощью выработать у читателя понятия об электричестве".

"В большом Трактате я зачастую использовал методы, по моему мнению, не самые лучшие, но без которых учащийся не смог бы идти по стопам основоположников Математической Теории Электричества. Но теперь я еще больше убежден в превосходстве методов, родственных подходу Фарадея, и здесь применяю их с самого начала".

Трудно пока предсказать будущее "Трактата об Электричестве и Магнетизме", но нет сомнения, что сразу после опубликования он дал направление и окраску всей Науке об Электричестве. Он стал последним словом Мастера о предмете, которому он посвятил многие годы своей жизни, и все, что он здесь сделал, нашло должное место в Трактате. Отдельные главы, особенно об Электромагнетизме, практически воспроизводят его мемуары с некоторыми, правда, исправлениями и улучшениями. Трактат замечателен разработкой математических подробностей, не уступающей изложению физических принципов, и богат оригинальными главами о математических предметах, связанных с основным содержанием. Сюда относятся разделы о Сферических Гармониках и об Уравнениях Лагранжа в Динамике.

Происхождение и развитие идей и понятий Максвелла об электрическом действии, достигших кульминации в трактате, где все они упорядочены и взаимосвязаны, образуют интересную главу не только в истории мышления, но и в истории науки об электричестве. Вряд ли можно переоценить влияние открытий и размышлений Фарадея на Максвелла, который сам рассказал нам, что перед тем, как начать изучение электричества, он принял решение не читать никакой математики, пока не одолеет "Опытных исследований". Но до этого он был многим обязан и идеям, содержащимся в весьма важных статьях Сэра У. Томсона об аналогии между Теплопроводностью и Статическим Электричеством и о Математической Теории Равновесного Электричества. Вся же последующая деятельность Максвелла, окрашенная одержимостью идеями и подходом Фарадея, являет собой картину могучего интеллекта, терпеливо и упорно проясняющего темные области предмета исследований. Тут его изобретательность была безотказной.

Королевское морское училище.

Гринвич.

Август 1890 г.

ОСОБЕННОСТИ МАКСВЕЛЛОВСКОГО "ТРАКТАТА ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ И МАГНЕТИЗМЕ" И ПРИНЦИПЫ НАУЧНОГО ПЕРЕВОДА

М. Л. Левин, М. А. Муллер, Е. В. Суворов

*"War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb!"
Göthe. "Faust"*

1. Принципы перевода

Перевод любого текста, художественного или научного, обычно представляет собой компромисс между двумя крайностями – смысловым и буквальным соответствием оригиналу. Мы столкнулись с этими проблемами конкретно и практически, когда взялись за перевод максвелловского "Трактата об Электричестве и Магнетизме". Конечно, для полноценного восприятия суждений, излагаемых далее, читатель (в идеале) должен бы держать перед собой английский и русский тексты трактата одновременно. Но это недостижимо; если английский вариант еще можно попытаться извлечь из ИНТЕРНЕТа, то русский затаился на полках избранных библиотек и научных книгочеев. Поэтому мы попытались приспособить наше изложение к суровой российской действительности и поделиться своими взглядами на принципы научного перевода, хотя и опирающиеся на "Трактат", но воспринимаемые без особых трудностей и в отрыве от него. Вместе с тем, многие приводимые далее суждения, обращенные напрямик к "Трактату", выполняют и более широкие, чем чисто переводческие задачи, ибо характер мышления автора проявляется через его стилистику, через сочетательность в ней логики и образности. "Трактат" в этом отношении являет собой открытую книгу, "книгу нараспашку", – в ней Максвелл без утайки предъявляет себя для диагностических заключений о нем самом. Так что обсуждение особенностей перевода фактически пересекается с из-

учением характера Максвелла, как ученого и как человека, т. е. может служить важным дополнением к его биографии.

Итак, перейдем к изложению некоторых принципов перевода, сформулированных нами в процессе работы над "Трактатом".

Первый из них – нечто вроде *принципа стилистического соответствия*. Мы стремились не изменять максвелловскую манеру письма, не улучшать, не приближать ее к современной, не трактовать "Трактат", останавливаясь в этом стремлении лишь перед неизбежными различиями языковых норм. Сохранялась не только крупномасштабная архитектура текста, но и конструкция фразы почти всюду, где англоподобность еще не должна была, по нашему мнению, отторгать русского читателя от более или менее непринужденного ее восприятия.

Язык Максвелла своеобразен. За кажущейся простотой, частыми повторами равносмысловых утверждений, отступлениями, перескоками видится и логическая, и эмоциональная направленность, так что определенная доля аллитераций и стилистических сбоев должна восприниматься не как косноязычие, а как средство литературного воздействия, и было бы досадно выгладить это при переводе.

В своем первоначальном назначении "Трактат" имел целью изложение новых взглядов на свойства (а отчасти и на природу) электромагнетизма, и читатель тех времен следил за ходом повествования, еще не зная правильного ответа, вернее, еще не будучи уверенным в правильности его. Поэтому как сама аргументация, так и форма представления ее также поддерживала совсем иные, чем сейчас, отношения между автором и читателем.

Сохранение таких нюансов является, наверное, заповедным правилом любого перевода и уж тем паче перевода исторически значимого материала, но оно заведомо требует высокого лингвистического мастерства; поэтому-то мы, опасаясь промахов, тяготели – при отсутствии явных противопоказаний – в сторону пунктуального переноса стилистики. Этому отчасти благоприятствовало изменение функций "Трактата", происшедшее за столетие. Первоначально они были не только чисто научные, но и учебные. Как учебное пособие "Трактат" был необычен, ибо в нем много места отводилось "неокончательным утверждениям", а потому он казался многословным, допускал возможность методических улучшений и разъяснений и т. д. Вполне вероятно, что перевод его на русский язык в те времена (к сожалению, не случившийся) поощрял бы большее предпочтение смысла над формой.

Когда Максвелл представил взору физиков свое в муках рожденное детище – уравнения электромагнетизма – в еще не очищенном от плацентных наслоений виде, многие знатоки не смогли усмотреть в странных "готических уродцах" их будущей разумности, стройности и

почти неземной красоты. Особенно трудно это давалось континентальным ученым (Гельмгольц, Пуанкаре и др.). Те привыкли к дисциплинированному, строго последовательному мышлению, когда любое продвижение вперед суть обобщение уже достигнутого. А тут вдруг скачком – новая фарадеевская парадигма: электромагнитное поле может отрываться от своих источников (зарядов и токов) и существовать автономно. Как это часто бывает, первоначальное отталкивающее неприятие вскоре сменялось свехвосторженными признаниями именно на континенте. В частности, Больцман даже впал в анималистическую эйфорию, заподозрив, что уравнения Максвелла имитируют свойства живых существ, будучи способными сами творить мир электромагнитных движений. И поэтому столь торжественно звучит его молитвенно-благодарственное восклицание, заимствованное из "Фауста" Гете:

War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb!
(Не один ли из богов начертал нам эти знаки!)

Переводам поэзии только в редчайших случаях удается передавать все оттенки содержания и звучания оригинала, поскольку в отличие от прозы – особенно выхолощенной до логической схемы – в поэтических произведениях "настроение слов" бывает даже первичнее их смысла. Так, например, даже перевод этого пассажа, сделанный самим Пастернаком ("Кто из богов придумал этот знак"), все-таки не адекватно передает то чувство благоговения перед Великими Знаками Природы, которое присутствует у Гете.

Göthe:

*War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb,
Die mir das innere Toben stillen,
Das arme Herz mit Freude füllen,
Und mit geheimnisvollem Trieb
Die Kräfte der Natur rings um mich her enthüllen?
Bin ich ein Gott? Mir wird so licht!
Ich schau' in diesen reinen Zügen
Die wirkende Natur vor meiner Seele liegen.*

Пастернак:

*Кто из богов придумал этот знак?
Какое исцеленье от унынья
Дает мне сочетание этих линий!
Расходится томивший душу мрак,
Все проясняется, как на картине.
И вот мне кажется, что сам я – бог
И вижу, символ мира разбирая,
Вселенную от края и до края.*

Современный читатель знакомится с "Трактатом" с иными намерениями: им руководит – насколько мы вправе судить – скорее историческая любознательность, реже – желание получить фактическую справку и, почти как исключение, потребность пополнить свое предметное образование. Снятие образовательных обязанностей как раз и позволяет оставить в неприкосновенности повторы, длинноты, кажущиеся или фактические непоследовательности, загадочности и т. п. и, главное, не вносить оживляющего грамматического разнообразия там, где оно отсутствует у самого Максвелла. Например, Максвелл довольно часто, повторяясь от фразы к фразе, постепенно развивает тот или иной тезис, словно разглядывая его под разными углами. И при этом отдает предпочтение условным оборотам: "если предположить", "если допустить", "если взять" и даже "если обозначить", как бы позволяя при этом свободу и другим возможностям. Мы практически нигде не изменяли этих наклонений, хотя и понимали, что по-английски они несут на себе отпечаток меньшей осторожности, чем по-русски.

Второй принцип следовало бы назвать "*принципом наименьшего вмешательства*" или даже категоричнее – *принципом невмешательства* в авторский текст. Сам по себе он вроде бы очевиден, но предусматривает текстологическую ясность, т. е. знание того, что есть авторский текст, а как раз в этом мы испытывали некоторые затруднения. Только в совершенно очевидных случаях исправления опечаток или недочеток производились негласно. Никаких посягательств на места, казавшиеся нам странными или даже неточными, не делалось. Более того, мы старались переводить их строже, указывая при необходимости на неоднозначности оборотов. Даже комментирование таких мест могло граничить с нарушением исторического такта, т. е. с использованием разности времен и знаний на предмет снисходительного поучения.

Так мы пришли к принятию третьего принципа – *сдержанности в комментариях*. Хотя максвелловская электродинамика являет собой пример физической теории, надолго сохраняющей свой первоначальный облик в неприкосновенности, все же за прошедшее столетие был достигнут значительный прогресс в ее интерпретации и методике изложения. Множество разноплановых монографий и учебников появилось за это время и находится в активном обращении. Возросла культура и техника работы с уравнениями Максвелла, и это позволило извлекать из них результаты, на которые Максвелл вышел "независимо и много раньше", весьма экономными средствами и с большим пониманием их подчиненности общим законам и принципам. Следовательно, эти книги вполне могут сойти за развернутые комментарии к "Трактату", хотя их авторы, как правило, и не ведут свои исчисления непосредственно от "Трактата".

С другой стороны, именно методическое оснащение позволяет нам сейчас легче понимать максвелловский язык, чем его современникам. Более того, он эмоционально воспринимается как перевозданный, его архаизмы не раздражают, а те трудности, на которые сетовали некоторые "логически настроенные" первые читатели "Трактата", преодолеваются нами более непринужденно, поскольку мы приучены к полевому мышлению, обладаем обогащенной интуицией и, главное, уверенно знаем, что уравнения Максвелла правильно описывают все макроэлектродинамические явления. Так что даже выдающиеся по тем временам комментарии Больцмана (частично переведенные на русский язык) сейчас уже, по нашему разумению, не могут сопровождать "Трактат". Они принадлежат к истории преодоления недоверия, очищения здания от строительных лесов.

Последний оборот идет от самого Максвелла, который сознательно, следуя воодушевляющему примеру Фарадея, не избегал вводить читателя в свою (как сказали бы сейчас) творческую лабораторию. Да и многие другие прямые комментаторы "Трактата" фактически исполняли агитационные и очистительные функции, с которыми успешно справилась сама жизнь. И мы не сочли нужным собирать их под одним переплетом, ограничившись только ссылками. Соответственно и свое собственное отношение мы старались выражать редко и ненавязчиво, преодолев опасения быть заподозренными в нерадивости. Есть, правда, по крайней мере один изъян в тактике скупого комментирования: не раскрыты именные ссылки, даваемые Максвеллом, подобно тому, как это было сделано, например, при переводе трудов Фарадея.

Наконец, четвертый принцип работы над переводом относится к терминологии и может быть назван *принципом непосягаемости на старинные слова*. Далее в п. 2 мы вкратце поясним максвелловскую систему обозначений, принятую в "Трактате", довольно многоплановую и многозначимую. Пока же сосредоточимся на чисто переводческих загвоздках. Создавая электродинамику, Максвелл, естественно, ввёл множество новых терминов, которые обычно отпочковывались от образных пояснений определенных физических событий и, как многие первые обозначения понятий, были в своей эмбриональной стадии метафоричны. Установление связей между ранее, казалось бы, независимыми величинами сопровождалось совмещениями соответствующих терминов; при этом, как правило, рождалось и новое понимание их физической сущности. Значит, одновременно с эволюцией понятий происходила эволюция слов. Но, к сожалению, в английском и русском языках однозначной связи между этими лингвистическими процессами не существовало. У нас совершался свой – слегка смещенный по времени – процесс формирования электродинамического словаря. Когда речь

шла о промежуточных обозначениях, играющих роль неформальных разъяснительных образов, то, поскольку они не получили в русском языке даже временного употребления, мы осмелились вставлять их в историю электродинамики ретроспективно.

Так возникли слегка непривычные нам словообразования "индуктивная способность", "магнитная индуктивная емкость" и т. п. Но в большинстве других случаев приходилось сталкиваться с уже укоренившимися словами, посягательство на которые потребовало бы перучения людей; поневоле следовало держаться старинных обычаев, несмотря на то что их создатели распоряжались ими не очень удачно, поскольку было (и будет!) не так-то просто предугадывать смысловое обогащение понятий, подстерегающее их по ходу развития науки. Действительно, многие обозначения возникли из ассоциаций с первыми, обычно экспериментальными, проявлениями: магнит, электрон, поле и т. п., а затем их содержание углублялось и утрачивало связь с происхождением.

Иногда возникает искушение (наивное, как всякое преобразование методом распоряжений сверху) взять и, собравшись с духом, провести всеобщую реформу перевода всех обозначений взамен старых, исторически сложившихся, но, увы, не отразивших окончательного назначения своего. Если такое и произойдет, то, скорее всего, при изобретении нового языка, не обремененного увесистыми традициями, языка изолированного, кастового, слова которого не будут диффундировать по живым языкам, подобно старой латыни. А пока приходится приноравливаться.

Вот несколько примеров. В максвелловские времена довольно часто слово *electrification* употреблялось и для обозначения процесса заряжения, и как характеристика состояния наэлектризованности. В русском языке его функции распределились по разным словам, хотя можно было бы ввести заряжение и заряженность, электризация и наэлектризованность... Далее, Максвелл часто использует абстрактный образ *electrified point* (заряженная точка), а мы его вынуждены переводить как точечный заряд (*point charge*), придавая сему более модельный оттенок. То же самое несоответствие наличествует и в случае заряженного объема и, строго говоря, не тождественного с объемным зарядом. И вдруг в двумерном случае русский язык разрешает эти два понятия – геометрическое (заряженная поверхность) и модельное (поверхностный заряд) – употреблять раздельно и независимо.

Другой, еще более выразительный пример принудительного следования традициям связан с запутанным использованием слова "сила". Даже в физическом словаре оно испытало сильные перегрузки. Это, прежде всего, обычная механическая сила (иногда говорят пондеромоторная, но как разнообразящий синоним – без альтернатив). Ему соот-

ветствует английское слово *force*. Значит, слово "сила" ассоциируется с размерной физической величиной. Однако мы часто прибегаем к "силе" в безразмерном значении: сила тока, сила магнитного полюса и т. п. В английской лексике это уже не *force*, а *strength*, т. е. скорее напряженность или даже сильность, но не сила; с другой стороны, "напряженность" приходится прибегать для перевода английского "*intensity*", потому что "*интенсивность*" в русском языке выглядит как скалярное понятие, тогда как напряженность может смотреться и как векторное тоже... Перечень этих пересечений можно было бы продлить. До сих пор в ходу понятие "живая сила", которая имеет размерность энергии или лошадиной силы, имеющей размерность мощности (*horse power*). В общем, основания к преобразованию обозначений вполне аргументируемы, и, в принципе, их следовало бы начать с переписывания исходных монографий, но это задержало бы перевод "Трактата" на неопределенный срок, ибо человечеству пока еще не суждено договориться даже и по более важным вопросам.

2. Терминология, обозначения

В нашем современном представлении "Трактат" схож с книгой, миновавшей процедуру внутрииздательского редактирования. Правда, сейчас, когда он перешел в ранг исторических памятников, это обстоятельство имеет и благоприятные стороны, поскольку его с большим основанием можно воспринимать как истинно максвелловский, почти "рукописный" документ и изучать с его помощью даже некоторые психологические аспекты творчества (что, кстати, часто затрудняется в наши дни из-за возрастающего вмешательства в текст "теневых соавторов"). Символика и терминология "Трактата" тоже показательны. Максвелл порой необычно многообразен в словесных наименованиях сходных или даже одинаковых физических величин. Некоторые его понятия живут, развиваются, а затем исчезают вовсе, другим он остается верен до конца, иногда чередуя две или три их разновидности. Например, диэлектрическая проницаемость сначала появляется как электрическая индуктивная способность (емкость, *capacity*), потом – как диэлектрическая постоянная, потом – как проницаемость.

Это отражает действительную картину разноразличия, имевшего место до максвелловского объединения статического и переменного электромагнетизма с оптикой. Аналогичные многоликости свойственны и электромагнитным полям: они обретают разные имена почти при всяком своем независимом появлении на свет. Если речь идет об электрическом поле, то это и электрическая сила (*electric force*), когда оно

определяет воздействие одного заряда на другой, это и электрическая интенсивность (*electric intensity*), когда оно – самостоятельное (оторванное от источников) поле в среде – (оставаясь, однако, по-прежнему величиной векторной, направленной вдоль линии силы), это напряженность ЭДС или даже просто ЭДС в точке (*electromotive intensity, electromotive force at a point*), т. е. плотность ЭДС (*at a point density*), прежде всего, когда электрическое поле возникает в результате изменения магнитного потока.

А вот с напряженностью магнитного поля никакого разносливия нет – она всегда фигурирует как магнитная сила (*magnetic force*), хотя, заметим, и не обладает размерностью механической силы. Конечно, метания не случайны: они отражают изменения взглядов на понятия и то состояние поиска, в котором пребывал Максвелл при написании "Трактата" и даже после. Некоторые из терминов (*displacement, flux, current*) носят следы аналогий, моделей. Как мы знаем, впоследствии разные по происхождению поля E слились в одно электрическое поле, а поле H так и осталось самим собой (т. е. магнитным полем), утратив лишь отвлекающую "силовую часть". Что же касается векторов D и B , то здесь терминология и вовсе не претерпела изменений: и у Максвелла, и в наши дни употребляются на равных правах термины электрическое смещение и электрическая индукция (это D), и всюду без исключений – магнитная индукция (это B). При этом иногда Максвелл придает этим понятиям и смысл векторной плотности соответственно электрических и магнитных потоков, но слово "плотность" опускает, называя все это просто потоками (*flux*), а то, что сейчас называется потоком, он обозначает как полный (интегральный) поток (*total flux*).

Здесь мы были вынуждены отступить от "принципа сохранения устаревших слов" и следовать поздней терминологии. Иначе современный читатель вконец запутался бы, или же текст был бы испещрен назойливыми пометками. Обратим внимание, что в наше время некоторые часто встречающиеся термины дублируются привычно закрепленными за ними буквами, приобретающими тем самым функции и обозначений, и наименований. Но такая стандартизация электромагнитной символики (в ряде случаев интернациональная) пришла позже, в "Трактате" почти для всех векторных величин Максвелл прибегает к заглавным готическим буквам, непривычным для глаза многих пользователей даже из латиноалфавитных стран, поэтому первоначальные максвелловские обозначения не получили никакого распространения, что, между прочим, не так уж часто бывает в физике.

3. Структура

Несколько слов о внутренних, методических особенностях структуры "Трактата". Сейчас сложился прочный стереотип изложения основ макроэлектродинамики. Он состоит в двухэтапном подходе. На первом этапе осуществляется собирание экспериментальных фактов и ступенчатое обобщение охватывающих эти факты законов. Это стадия индуктивных догадок и обобщений, стадия восхождения к уравнениям Максвелла. Затем они постулируются как исходные, первоначальные законы Природы, и далее изучаются результаты последовательного дедуктивного приложения этих законов к разным, в той или иной степени упрощенным моделям и сопоставляются с доступными наблюдению фактами. Эта стадия исследования решений уравнений относится сейчас в основном к теоретической физике – разделу, посвященному теории электромагнитного поля.

Не будем стремиться понять, почему первая – восходящая ветвь – считается более общей (точнее, более экспериментальной) физикой, чем вторая. Важно иное. Ведь обучение многим знаниям, не только физике и не только электромагнетизму, происходит, как правило, двухзаходно, причем индуктивная цепочка предшествует дедуктивной (этим же словами здесь и далее мы оперируем несколько упрощенно и скорее в целях обозначений, а не характеризований, т. е. отнюдь не утверждая, что индуктивные и дедуктивные приемы так категорично разнесены по стадиям). Наверное, считается, что воспроизведение в целях обучения этого естественного хода познания законов природы (а ведь именно так мы осваиваем окружающий мир по мере своего взросления) адекватен психоневрологической сущности людей. Исторически впервые такой прием был испробован на механике. Там, отправляясь от законов равновесия и движения простейших тел под воздействием на них внешних сил, постепенно наращивались обобщения с выходом на аналитическую динамику сплошных (непрерывных) сред, вершинные уравнения которой могли быть извлечены из принципа наименьшего действия.

В середине XIX в., когда у Максвелла созрели намерения привести в систему многочисленные разрозненные факты и законы, относящиеся к электромагнетизму, эта программа построения Великой Науки Динамики (мы употребляем здесь максвелловские эпитеты и максвелловский способ придания патетичности высказываниям путем привлечения заглавных букв к заглавным словам) была во многих своих частях завершена. Но Максвелл, опоздав стать ее создателем, несомненно являлся ее знатоком и воплостителем. На опыте динамики можно было основывать методику создания и других динамико-подобных (тоже максвелловский оборот) наук: наикратчайшими путями выходить на наиболее общие законы, которые затем анализировать и сопоставлять с на-

блюдениями во всех наивозможнейших частных ситуациях. И вот эту работу Максвелл проделал, можно сказать, в одиночку, тогда как в Динамике она соединила усилия нескольких поколений разнохарактерных соиздателей (Ньютон, Эйлер, Лагранж, Гамильтон...).

Конечно, и у Максвелла были Великие и Проницательные Предшественники, в первую очередь Фарадей, но функции обобщения, объединения и анализа Максвелл исполнил сам. В этом смысле "Трактат" можно квалифицировать как первый в истории образец научного произведения (мы не знаем, есть ли второй), соединившего в себе основополагающую монографию, т. е. фолиант, систематизирующий старые и устанавливающий новые связи в природе явлений, и учебно-методическое пособие, педагогически последовательно, двухэтапно вводящее обучающегося читателя (у Максвелла неоднократно прорываются прямые обращения – "учащийся", "обучающийся", "студент") в курс нового знания и понимания. Наверное, мы несколько утрируем картину, но намеренно, чтобы контрастнее выставить максвелловский замысел "Трактата" – в едином сочинении провести охват всего электромагнетизма по восходящим и нисходящим путям. Эта программа раскрывается в самом начале "Трактата".

Вот что пишет Максвелл в Предисловии: "Я полагал бы, что будет полезен трактат, который имел бы главной своей задачей охват всего предмета в целом, с общей методической точки зрения...". Кстати сказать, Предисловие к "Трактату" заслуживает отдельного изучения, это самостоятельное произведение науки (и науковедения). Затем Максвелл возвращается к вопросу о структуре книги по мере продвижения вперед. У него есть даже специальный пункт (сохранившийся при подготовке второго издания!) – "План Трактата и сводка его результатов". И допустимо предположить, что он вернулся бы к обсуждению этих вопросов в Заключении к последующим изданиям, если бы жизнь предоставила ему такую возможность.

4. Основные идеи

Казалось бы, не должно возникать трудностей выявления основополагающих идей, на которые опирался Максвелл при создании общей теории электромагнетизма: он неоднократно и подробно (местами, как считалось некоторыми его современниками, даже излишне пространно) пишет о них сам. Мы выделим их примерно в том же порядке, в котором они развиваются в "Трактате". Прежде всего, это понятие физического поля; затем – скалярных и векторных величин, описывающих поля математически; далее – принцип близкодействия, как-то есте-

ственно протекающий из принятия существования полей, непрерывно распределенных в пространстве и изменяющихся во времени; наконец, введение тока смещения на равных правах с током проводимости (и током конвекции), благодаря чему упрочивался вывод об универсальном соблюдении закона сохранения заряда (уравнение непрерывности для тока аналогично соответствующему уравнению в гидродинамике).

Однако помимо этих идей "Трактат" содержит и другие, столь открыто не провозглашаемые, но тоже весьма значимые. В некоторых случаях это стало понятно лишь впоследствии, через поколения.

В историческом плане сюда же примыкает и вопрос о предшественниках, особо близких, непосредственных, тех, кто своими результатами, предсказаниями и т. п. инициировал максвелловские раздумья над явлениями электромагнетизма, и тех, кто, по существу, снабдил его удобными для описания этих явлений инструментарием.

Максвелла – за редчайшими исключениями – отличала тактичность и уважительность ко всем предшественникам. Но одного он выделял особо как образец Научного Величия и Научного Ясновидения. Речь идет, конечно же, о Фарадее. Вряд ли в те времена существовал какой-либо другой ученый, кроме Максвелла, проштудировавший "Труды" Фарадея так тщательно, так проникновенно и так благожелательно к ним. А ведь многим ревнителям строгих правил некоторые содержащиеся в них умозаключения казались, мягко говоря, не совсем вразумительными. Это какой-то парадоксальный стереотип "непризнания признанного". Человек, уже прослышавший Великим Исследователем Природы, казалось бы, должен был хотя бы настораживать людей каждым своим размышлением, намерением, поступком. А они, как замороженные, отмечают их, не вникнув, будто руководствуются какими-то тягостными соображениями типа "он так долго был прав, что когда-то должен начать быть неправым".

Фарадей был, по-видимому, человеком, которому нет и не может быть объяснений, если под таковыми понимать логические доводы. Он соединял в себе дотошную приверженность фактам, подкорковую бдительность к отвлекающим случайностям с симфоническим воображением, позволявшим ему составлять правильное представление о свойствах ответов без решения задач и без умения решать их в общепринятом понимании. По-видимому, он действительно приводил в состоянии раздражения немалое число "аналитиков" (Максвелл называет их "professed mathematicians", возможно, используя двусмысленность слова "professed" – профессиональный и считающий себя таковым), вынужденных признавать его Великие Открытия и не признавать свою неспособность проникнуться его образным мышлением. А ведь такие

люди, как Фарадей, принадлежа сами к странным ("аномальным") явлениям природы, именно потому и могли столь непринужденно просто углядывать не менее странные явления в Природе вообще. Вероятно, кое-что свойственное Фарадею, относится к самому Максвеллу, открывшему *этого* Фарадея, т. е. прочитавшему и расшифровавшему фарадеевские "письмена" с доверием к ним. Максвелл скромно сводит свою заслугу к переизложению идей Фарадея на язык математических соотношений. Но его показания не должны нас дезориентировать: мы понимаем, что само по себе открытие *этого* Фарадея потребовало от Максвелла не меньшего преодоления инерционности мышления, чем когда дело касалось явлений, причисляемых к неодушевленным.

Главнейшей концепцией Фарадея была концепция континуума, непрерывно распределенного в пространстве действия, поля – сначала поля электрических и магнитных сил, а потом уже и единого электромагнитного поля. Она не воспринималась всерьез его современниками, скорей всего, из-за того, что аналогия с механикой требовала введения какой-то особой эфирной среды, наделенной вымороченными свойствами. Максвелл не сразу, но сумел преодолеть этот "страх среды". Сначала он придумал механико-подобную электродинамику, затем фактически устроил механические подкрепления фарадеевской концепции поля и построил теорию этого поля, как потом стали говорить, феноменологически, оперируя с полями как с первоначальными физическими сущностями. Именно таким образом обстоит дело в "Трактате", в чем заключается его первостепенная научно-методическая значимость. Мы уже настолько привыкли к неизбежности обращения на том или ином иерархическом уровне описания к феноменологическим постулатам, что нам нелегко оценить то идеологическое мужество, которое нужно было проявить Максвеллу для принятия столь нетривиального решения. Это ведь не только про электродинамику, это про познание окружающего мира вообще.

Фактически еще ранее в теории гравитации (не говоря уже прямо об электростатике), развиваемой Лапласом, Пуассоном, Гринем, было использовано понятие поля, в частности поля скалярного потенциала и градиента от него, дающего силу, и все работали с этими понятиями, не подводя под них никаких несущих сред, но почему-то считали их не более чем математическими абстракциями. Максвелл неоднократно взывает к данному примеру как к иллюстрации удивительного взаимонепонимания между математически и физически мыслящими людьми, ибо полевая концепция Фарадея по существу состояла лишь в придании этим и аналогичным им решениям смысла наблюдаемых величин.

Приняв концепцию поля, Максвелл прежде всего предпринял пересмотр (и этому посвящена изрядная часть "Трактата") всех доселе известных и сравнительно хорошо разработанных разделов электри-

чества, магнетизма и проводимости ("conductance" – снова трудности перевода, по-русски это делается с помощью длинного оборота – "процесс прохождения токов по проводящим средам"). При этом Максвелл столь же непринужденно, сколь это делается в гидродинамике, вводит, кроме потенциальных векторных полей (обычных, но, заметим, отнюдь не обязательных даже в электростатике), поля вихревые. И хотя он нигде не дает явного доказательства простой, но определяющей многие топологические особенности векторных полей теоремы о представлении произвольного векторного поля в виде суперпозиции потенциального и вихревого, он широко пользуется таким разбиением как очевидным.

Следующий шаг должен был состоять в развитии аппарата векторной алгебры и анализа. Аппарат в том виде, в котором мы владеем им сейчас, как известно, был отработан чуть позже, но можно сказать, что это произошло в основном по заказу теории электромагнитного поля. Не следует, однако, принижать и прямой максвелловский вклад: Максвеллу принадлежит понимание адекватности векторного анализа, не говоря уже об инициативе его использования. Бытует мнение, что будто бы он предпочитал работать только с декартовыми компонентами векторов. Действительно, при решении многих конкретных задач (да еще при извлечении преимуществ от разделения переменных) он широко пользовался записью уравнений через проекции (не обязательно декартовы, разумеется). Но он не пропускал почти ни одной возможности – по крайней мере, в "Трактате" – написания общих уравнений в инвариантном векторном представлении. Правда, максвелловские обозначения не совсем привычны нашему глазу. Следуя Гамильтону и Тэту (а в те времена больше и некому было следовать), он стал работать со скалярами и векторами как с компонентами кватернионов.

Напомним, что кватернионом называется объект, состоящий из четырех компонент: одного действительного скаляра и трех мнимых составляющих вектора, причем каждой декартовой координате приписывается своя мнимая единица. Таким образом, вместо одной обычной мнимой единицы i , характеризующей свойством $i^2 = -1$, вводится три i, j, k ($i^2 = j^2 = k^2 = -1$), их различие между собой определяется попарной некоммутативностью, а именно $ij = k, ji = -k, jk = i, kj = -i, ik = -j, ki = j$.

Сейчас мы понимаем, что привлечение кватернионов удобно упрощает вычисления, связанные с некоммутативными величинами, например при трехмерных вращениях, теория которых была заложена еще Эйлером. Но в максвелловские времена люди не обращали внимания на такие тонкости, и кватернионика Гамильтона считалась чем-то вроде символа обособления гордой ирландской самобытности. А Максвелл принял ее в качестве рабочего инструмента и приспособил обслуживать фарадеевские поля, ибо кватернионика позволяла устано-

вить правила не только сложения, но и умножения векторов, а следовательно, открывала путь к построению векторного дифференциального исчисления. Действительно, если рассматривать векторное поле A (A_α , $\alpha = 1, 2, 3$ – индексы соответствуют номерам координатных осей) как векторную часть кватерниона \mathfrak{A} (следуя Максвеллу, снабжаем кватернионы готическими обозначениями), то произведение двух чисто векторных кватернионов (их иногда называют ассоциированными) $\mathfrak{A} \cdot \mathfrak{B}$, выполненное с учетом правил коммутации i, j, k , будет содержать *векторную часть* (Максвелл обозначает ее $V \cdot \mathfrak{A} \mathfrak{B}$) и *скалярную часть* ($S \cdot \mathfrak{A} \mathfrak{B}$), и ничего более. Судя по воспоминаниям, Гамильтон очень гордился этим результатом и имел к тому основания.

В современном представлении через действительные проекции произведение векторов A_α и B_β в общем случае выглядит как симметричный диадный тензор $A_\alpha B_\beta$. По известной теореме приведения он может быть разложен на три "элементарных" (неприводимых) группы: группу скаляров $A_\alpha B_\alpha$ (по дважды встречающимся индексам производится суммирование $\alpha\alpha \equiv \sum_{\alpha=1}^3$), группу векторов (псевдовекторов)

$e_{\alpha\beta\gamma} A_\beta B_\gamma$ ($e_{\alpha\beta\gamma}$ – единичный антисимметричный тензор) и группу симметричных тензоров с нулевым следом ($A_\alpha B_\beta + A_\beta B_\alpha - 2/3 \delta_{\alpha\beta} A_\gamma B_\gamma$); $\delta_{\alpha\beta}$ – единичный симметричный тензор; последняя группа повышает ранг описания *векторных* полей и потому "не задействована" в формулировке скалярных и векторных уравнений электродинамики (во всяком случае, применительно к неэкзотическим ситуациям). Кватернионная операция умножения векторов производит это отменение тензоров второго ранга автоматически.

Этими несколько подробными сопоставлениями векторных действительных и векторных кватернионных манипуляций мы, с одной стороны, дополняем информацию п. 2 об обозначениях "Трактата", а с другой – хотим отметить высокое качество принятой в нем терминологии, в определенном смысле более адекватной существу дела, чем наша. В самом деле, *скалярная часть* произведения векторов

$$S \cdot \mathfrak{A} \mathfrak{B} \rightarrow \mathbf{AB} = A_\alpha B_\alpha$$

и *векторная часть* произведения векторов

$$V \cdot \mathfrak{A} \mathfrak{B} \Rightarrow [\mathbf{A} \times \mathbf{B}] \rightarrow e_{\alpha\beta\gamma} A_\beta B_\gamma$$

лингвистически последовательнее отражают существо теоремы приведения, чем наши в общем-то жаргонные обороты *скалярное* и *векторное произведение*.

Конечно, сейчас большинство из нас является приверженцами описания скалярных и векторных полей в действительных переменных,

считая его нагляднее кватернионного. Но ведь наглядность – свойство человеческое – прививаемое и воспитываемое. А по строгости оба подхода равноправны.

Далее Максвелл, тоже след за Гамильтоном, вводит оператор дифференцирования $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x_1} + j \frac{\partial}{\partial x_2} + k \frac{\partial}{\partial x_3}$. Собственно говоря, это и есть истинный оператор Гамильтона, а наш модифицированный вариант "набла" приспособлен к действительным переменным и не содержит комплексных факторов i, j, k . С помощью этого оператора образуются три новых математических образа: градиент скаляра ($\nabla \bullet \phi$), ротор, или вихрь вектора,

$$\nabla \bullet \nabla \mathbf{A} = \text{rot } \mathbf{A} = \nabla \times \mathbf{A} \rightarrow e_{\alpha\beta\gamma} \nabla_{\beta} A_{\gamma}$$

и конвергенция (равная дивергенции с обратным знаком)

$$-S \bullet \nabla \mathbf{A} = -\text{div } \mathbf{A} = \nabla \bullet \mathbf{A} = \nabla_{\alpha} A_{\alpha}$$

а также соответствующие операции второго порядка, важнейшая из которых,

$$\nabla \bullet \nabla \phi = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\alpha}},$$

эквивалентна "нашему" лапласиану с противоположным знаком.

Важность этого математического языка несомненна. Без него уравнения поля не удалось придать бы столь универсального охвата. Так что второе открытие Максвелла в "одушевленной части" природы было связано с кватернионикой Гамильтона, и оно произошло тоже, как и в случае Фарадея, вопреки общепринятым мнениям профессионалов. Конечно, Максвелл не довел этот аппарат до современного автоматизма, базирующегося на небольшом числе векторных тождеств, с которыми сейчас быстро осваиваются студенты, но это не умаляет его общей заслуги. Тем более, что он пошел в определенном смысле дальше. Ведь его цель состояла в придании аналитического представления идеям Фарадея, а тот видел поля, как целостные электрические и магнитные "пейзажи", что было адекватно лишь крупномасштабной топологии. И в этом случае Максвеллу опять "повезло": его снова "поджидал" практически завершённый аппарат интегральных теорем, известных нам как теоремы Гаусса – Остроградского и Стокса, который позволил написать уравнения электромагнитного поля в интегральной форме. Правда, в отличие от дифференциальных, эти уравнения не собраны воедино в "Трактате", а разбросаны по специализированным главам. Но, как следует из Предварительной главы, Максвелл намеревался систематизировать свои топологические идеи на базе кри-

териев перифрактичности, характеризующих трехмерные многосвязные области.

К сожалению, нам не дано восстановить ход его замыслов. И поэтому, вероятно, некоторые фрагменты рассуждений на эти темы мы принимаем скептически. Например, Максвелл различает векторные поля двух типов – потоковые (пронизывающие поверхности, "ассоциируемые" с ними) и силовые (направленные вдоль линий, "ассоциируемые" с линиями). Такая классификация кажется нам отчасти ситуационной: она, с нашей точки зрения, выполняла функцию наведения, т. е. помогала Максвеллу связать между собой изменения электрических и магнитных полей в пространстве и во времени, но не более того. Формулируя закон индукции Фарадея в интегральной форме

$$\oint_l \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S}$$

(всюду, где не оговорено иное, мы пользуемся в Послесловии гауссовыми единицами и стандартной современной символикой), Максвелл различал общетопологические свойства конфигураций, образованных полями \mathbf{E} , \mathbf{H} (работает только их вихревая часть, закручиваемая вдоль замкнутых линий) и полями, пронизывающими поверхность, ограничиваемую этим контуром. Отсюда вытекала максвелловская классификация, касающаяся потоковых и силовых векторов. К числу линииподобных векторов Максвелл относил \mathbf{E} , \mathbf{H} , вектор-потенциал \mathbf{A} и т. п., а к потоковым векторам – \mathbf{B} , \mathbf{D} , плотность электрического тока \mathbf{j} и т. п. Но, уже придя к уравнениям материальных связей в виде $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$, $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$, он признал равноправие векторных полей обоих типов, в том числе и топологическое равноправие.

Следующий этап состоял в использовании всего перечисленного выше идейного и технического оснащения для установления наиболее общих закономерностей электромагнетизма. Сотни, а может быть и более, работ посвящены изучению фактических и предполагаемых путей, которым следовал или мог следовать Максвелл при продвижении к своим Великим Уравнениям.

Прежде всего у него на вооружении был принцип близкодействия, в согласии с которым все возмущения (а значит, и электрические – магнитные тоже) должны передаваться в пространстве с конечной скоростью и территориально последовательно – от одного элемента пространства (среды) к другому, прилегающему к нему (*adjacent*). Это означало, что соответствующий математический аппарат должен был опираться на дифференциальные (а не разностные или дифференциально-разностные) уравнения в частных производных по координатам и времени.

После этого он записал все известные до него законы электромагнетизма в форме таких уравнений. И сделал решающий шаг, дополнив их током смещения. Что же побудило его к этому? Вопрос становится уже отчасти "легендарным" в том смысле, что ответ на него обрастает историческими легендами. Совсем непросто вжиться в предыдущую эпоху из последующих: невольно прокрадывается стремление придать ходу истории большую целеустремленность и последовательность, чем она может себе позволить сама. В итоге возникают различные реконструкции, использующие методику и логику уверенного в своей правоте будущего. Вполне возможно, что Максвелл привлекал все доводы, какие были вскрыты или допридуманы потом в научно-исторических исследованиях, но одни из них играли роль первичных догадок, а другие – проверок на внутреннюю непротиворечивость и на внешнюю совместимость с общими законами природы.

Вероятно, его внимание привлекало простейшее модельное рассуждение, опирающееся на аналогию с "верной" Динамикой. Оно состояло в необходимости возникновения реального смещения "зарядоносителей" под действием силовых полей. Отсюда и эта терминология из теории упругости: вектор электрического смещения, ток смещения (тоже электрического, ибо соответствующая ему величина в магнетизме оставлена безымянной). Затем допустимо думать, что были привлечены размышления о прохождении электрического тока по последовательной цепи проводник – емкость, когда условия непрерывности изменения окружающего магнитного поля вдоль цепи вынуждают ввести какое-то продолжение тока проводимости внутри конденсатора.

Далее, может быть, уже на уровне контроля возникла формально математическая потребность привести нововведение в непротиворечие с уравнением непрерывности для тока, что тоже удачно сочеталось с модельной картинкой, заимствованной из аналогии с механикой непрерывных сред. Был еще один путь получения правильных уравнений – их симметризация. Максвелл тщательным образом сделал все необходимые для этого заготовки, фактически сформулировав принцип дуальности (двойственности) электрических и магнитных полей в статическом приближении, но никаких слов о распространении этого принципа на изменяющиеся во времени поля в "Трактате" нет. Возможно, это чисто случайный пробел, и тогда он был бы наверняка восполнен при следующей правке "Трактата", но возможно и другое – Максвелл не пошел на введение каких-то фиктивных магнитных токов, поскольку они не укладывались ни в какие модельные представления. А ведь он был поборником модельной физики и, по-видимому, должен был представлять себе модельно все, что умел понять.

Наконец, если не держаться только явных свидетельств, содержащихся в "Трактате", то следует иметь в виду и такие поступательно-возвратные поисковые движения мысли, как подгонка исходных положений теории для получения законов, ведущих к разумным толкованиям наблюдаемых эффектов. Действительно, историческое реконструирование сходно с составлением сценария по законченному и отснятому фильму, а творческий процесс может включать в себя фрагменты, не попавшие в итоговые кадры. Скажем, стремясь соединить (по программе Фарадея) электромагнетизм с волновой оптикой, можно было отправляться от волнового уравнения для полей (или потенциалов) и надлежащим образом подправить систему уравнений первого порядка.

И все же аналоговый подход был для Максвелла, наверное, самым важным подкреплением чувства правоты. Как уже говорилось выше, "Трактат" являет собой произведение, почти очищенное от динамического оснащения, хотя и с ярко выраженным динамическим прошлым. В нем просматриваются две функции, исполненные Великой Наукой Динамикой. Первая состоит в установлении взаимных аналогий между гидродинамикой и электродинамикой, что не только не утратило, но и повысило свое значение впоследствии. В современном понимании Максвелл предложил принципиальные схемы построения аналоговых машин, причем сделал это не так, как обычно делается сейчас на основе общности математического описания, а наоборот – в предварении составления уравнений, как раз и получая свои уравнения из соображений физического сродства явлений. Привычность нашего обращения с аналогами, возможно, притупляет неочевидность максвелловского достижения. Тем более что потом направление этой аналогии изменило знак: для понимания и интерпретации явлений различной природы (в том числе и явлений динамических) теперь обычно уже используются электродинамические системы благодаря их доступной осуществимости и простоте интуитивных представлений.

С другой стороны, ориентация на Динамику выполняла еще одну функцию – функцию установления единства взглядов на устройство мира. В те времена Динамика была единственной областью физики с логически замкнутым описанием (постулаты → измерения → правила → измерения → выводы → измерения → постулаты) и сопоставление с ней давало некоторую страховку в том, что новая теория не войдет в противоречие с некоторыми общими физическими принципами (например, и прежде всего, законами сохранения), а это на начальном этапе было еще не так-то просто сделать напрямик. В таком объединении взглядов на гидродинамику и электродинамику Максвелла поджидал еще один успех. По аналогии с механикой он построил функцию Лагранжа для электромагнитных процессов (которая в случае электромеханических систем

получила известность потом как функция Лагранжа – Максвелла). Похоже на то, что он и сам недооценил общефизического значения этого достижения. Ведь фактически этим был проторен путь познания любого вида взаимодействия, для осторожности скажем, неживой природы.

Руководствуясь разумными доводами (например, поведениями представительных моделей в представительных условиях или соображениями симметрии, инвариантности и т. п.), можно попытаться угадать вид функции Лагранжа, а затем испытать ее на верность по стандартной схеме: уравнения движения → интерпретация → сравнение с экспериментом. Эта схема позволила, в частности, проникнуть в физику калибровочных полей. Она выглядит настолько естественной, что даже не ассоциируется с именем Максвелла – предельный случай полного признания, когда авторство утрачивается в силу общечеловеческой значимости, как при изобретении колеса.

5. Уравнения поля

“Теория Максвелла – это уравнения Максвелла”. Эта часто цитируемая оценка принадлежит Герцу. В ней есть лозунговая экстремальность – она выставляет независимость ценности правильного результата от поисковых блужданий. Конечно, в “Трактате” обсуждается еще и множество разнообразнейших проблем разной степени важности и общности, но уравнения электродинамики, несомненно, являют собой их кульминацию. Фактически уравнения были найдены задолго до первого издания “Трактата” и опубликованы в 1861–1862 годах. Но это не ослабляет волнения, охватывающего при знакомстве с ними в “Трактате”, наверное, из-за возможности следовать шаг за шагом максвелловским путем приближения к ним.

К счастью, Максвелл избежал участи некоторых других первооткрывателей – ему не пришлось бороться за приоритет. Уравнения были неожиданны и не сразу поняты. Многие другие исследователи, занятые аналогичными делами, т. е. развивающие свои варианты теории, не восприняли достижения Максвелла как решающие и тем более как завершающие. Одной из причин, наверное, было привлечение образной, фарадеевского толка аргументации, о чем уже несколько раз говорилось выше. Это отпугивало, по крайней мере, некоторых континентальных физиков. Как ни странно, но такая территориальная поляризация наблюдалась на самом деле: немецкая и французская наука была более привержена рассудочному, аналитическому способу познания, чем британская, тяготеющая к образным, геометрическим методам. И шло это традиционно еще со времен Великого Противостояния дифференциалов Лейбница и флюксий Ньютона.

Вообще написанные Максвеллом уравнения оказались "конкурентам" неубедительными и неубедительно обоснованными. И они не приняли их за фундаментальные исходные законы, по существу, не нуждающиеся в почленной аргументации и не подлежащие выводу из иерархически более элементарных (такая потребность возникла позже, в процессе создания квантовой теории поля).

Другими причинами были, видимо, изобилие этих уравнений, непривычный их облик и еще неполная очищенность от некоторых частностей (подробности чуть позже). Максвелл писал: "Эти соотношения можно считать основополагающими. Их можно было бы скомбинировать так, чтобы исключить некоторые из величин. Однако наша задача сейчас состоит не в получении компактных математических формул, а в написании выражения для каждого соотношения, о котором мы что-либо знаем. На этой стадии исследования исключение любой величины, отражающей полезную идею, было бы скорее потерей, чем выигрышем".

Представленная Максвеллом итоговая система уравнений (а в ней присутствовали уравнения и для полей, и для потенциалов, и материальные связи, и выражения для сил) была внутренне непротиворечива, так что решение вопроса об излишествах действительно отступало на второй план: все это уладилось позже при формулировке и доказательстве теорем единственности (и существования, конечно). Первостепеннее стояла проблема полноты и замкнутости (и достоверности, конечно). По этому поводу Максвелл не позволил себе высказывать какие-либо общие сентенции, но привел несколько простейших решений для предъявления экспериментаторам. Как мы знаем, все контрольные эффекты, предложенные самим Максвеллом (а также несколькими поколениями исследователей позже), прошли обоснованную экспериментальную экспертизу в том смысле, что были подтверждены в пределах точности, с которой макроскопическая электродинамика оказалась вообще справедливой.

Далее мы проведем сопоставление сводных уравнений электродинамики, содержащихся в "Трактате", с уравнениями Максвелла в их современном представлении. Для этого воспроизведем формульную часть "Кватернионных выражений для электромагнитных уравнений" и рядом с каждой трактатной формой поместим соответствующее ей выражение в обозначениях, принятых теперь с использованием гауссовой системы единиц.

Уравнение для магнитной индукции:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \text{rot } \mathbf{A},$$

(A)

\mathbf{B} – магнитная индукция, \mathbf{A} – вектор-потенциал (электрический).

Уравнения для электродвижущей напряженности:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= V \cdot \nabla \mathcal{A} - \dot{\mathcal{A}} - \nabla \Psi, \\ \mathbf{E} &= \frac{1}{c} \mathbf{u} \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial t} - \nabla \varphi, \end{aligned} \quad (\text{B})$$

\mathcal{E} – напряженность электрического поля, φ – скалярный потенциал (электрический), \mathbf{u} – скорость контура или системы отсчета, c – скорость света в вакууме.

Уравнение для механической силы:

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= V \cdot \nabla \mathcal{B} + e \mathcal{E} - m \nabla \Omega, \\ \mathbf{f} &= \frac{1}{c} \mathbf{j}_{\text{пол}}^e \times \mathbf{B} + \rho^e \mathbf{E} - \rho^m \nabla \Psi, \end{aligned} \quad (\text{C})$$

\mathbf{f} – объемная плотность силы, $\mathbf{j}_{\text{пол}}^e = \mathbf{j}_{\text{пр}}^e + \mathbf{j}_{\text{см}}^e$ – плотность полного (истинного) электрического тока, $\mathbf{j}_{\text{пр}}^e$ – плотность тока проводимости, $\mathbf{j}_{\text{см}}^e$ – плотность тока смещения, ρ^e – плотность электрического заряда, ρ^m – плотность магнитного заряда, Ψ – скалярный потенциал (магнитный).

Уравнение для намагничивания:

$$\begin{aligned} \mathcal{B} &= \mathcal{H} + 4\pi \mathcal{M}, \\ \mathbf{B} &= \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{M}, \end{aligned} \quad (\text{D})$$

\mathcal{B} – магнитная индукция, \mathcal{H} – напряженность магнитного поля, \mathcal{M} – вектор намагничивания.

Уравнение для электрических токов:

$$\begin{aligned} 4\pi \mathcal{E} &= V \cdot \nabla \mathcal{H}, \\ \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_{\text{пол}}^e &= \nabla \mathcal{H} = \text{rot } \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (\text{E})$$

Уравнение для токов проводимости:

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= c \mathcal{E}, \\ \mathbf{j}_{\text{пр}}^e &= \sigma \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (\text{G})$$

где σ – проводимость Среды.

Уравнение для электрического смещения:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{4\pi} k \mathbf{E},$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E},$$

(α)

ε – диэлектрическая проницаемость.

Уравнение для истинного тока:

$$\mathbf{G} = \mathbf{J} + \mathbf{D} = \left(c + \frac{1}{4\pi} k \right) \mathbf{E},$$

(H)

$$\mathbf{j}_{\text{пол}}^e = \mathbf{j}_{\text{п.р}}^e + \mathbf{j}_{\text{с.м}}^e = \left(\sigma + \frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{E}.$$

(I)

Уравнение для электрической объемной плотности:

$$\mathbf{e} = S \cdot \nabla \mathbf{D},$$

$$4\pi \rho^e = \nabla \cdot \mathbf{D} = \text{div } \mathbf{D}.$$

(J)

Уравнение для электрической поверхностной плотности $\rho_{\text{п.ов}}^e$:

$$4\pi \rho_{\text{п.ов}}^e = \mathbf{n}_{12} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1),$$

(K)

\mathbf{n}_{12} – нормаль к поверхности из среды 1 в среду 2.

Уравнение для намагничения:

$$\mathbf{H} = \mu \mathbf{H},$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H},$$

(L)

μ – магнитная проницаемость.

Уравнение для магнитной плотности:

$$\mathbf{m} = S \cdot \nabla \mathbf{J},$$

$$\rho^m = - \nabla \cdot \mathbf{M} = - \text{div } \mathbf{M}.$$

(β)

Уравнение для магнитной силы (когда $\text{rot } \mathbf{H} = 0$):

$$\mathbf{H} = - \nabla \Omega,$$

$$\mathbf{H} = - \nabla \Psi.$$

(γ)

Итак, перед нами совокупность сводных уравнений (А) – (γ), и мы в состоянии оценить их совершенство и правильность с позиций нашего понимания. Вообще говоря, она отличается от системы, впоследствии канонизированной как системы уравнений Максвелла. Но за малыми исключениями отличия скорее методические, а не принципиальные. Прежде всего, совокупность (А) – (γ) по-другому организована, и в этом, и в некоторых ее деталях еще проглядываются следы моделей, принимавших участие в процессе поиска. Это те самые строительные леса, отмеченные ранее Максвеллом – с признательностью за оставление их – в трудах Фарадея, и выходит, что по недосмотру сохранные теперь им самим. Кроме того, при перегруженности системы (А) – (γ) в ней есть известная незавершенность: в частности, не проведено несколько "напрашивающихся" обобщений, даже из числа уже подготовленных и обсужденных в тексте. И мы обязаны Дж. Дж. Томсону, Г. Герцу, О. Хевисайду и Х. Лоренцу тем, что именно они оказались доброжелательно вдумчивыми последователями, сумевшими первыми осознать непреходящее значение этих уравнений и довести их до того общего по смыслу и изящного по форме состояния, которое в наше время принимается за образец физической теории.

Опуская промежуточные этапы и мотивировки действий, приведем систему уравнений Максвелла в ее усовершенствованном представлении. Потом были предложены, возможно, более удачные (в отношении компоновки, объединения, обобщения, классификаций по типам симметрии и инвариантности и т. п.) варианты записи, но данная форма (лишь слегка подправленная позже) остается и по сей день одной из наиболее употребительных:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_{\text{п}p}^e + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho^e, \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \quad \mathbf{j}^e = \sigma\mathbf{E}^e, \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_{\text{мех}} = \rho^e\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{j}_{\text{п}p}^e \times \mathbf{B}. \quad (6)$$

Причем даже порядок расстановки уравнений настолько прижился, что в "определенных кругах" (кастовость тут тоже регламентируется научным происхождением) часто говорят, "как следует из первого, второго, и т. д. уравнения Максвелла", считая, видимо, перенумерацию

отступничеством от Заветов Учителя, хотя легко усмотреть из сравнения (А) – (γ) с (1)–(6), что все это дело рук Апостолов, а не Его Самого.

Сейчас принимается такая классификация. Уравнения (1)–(4) – собственно уравнения электромагнитного поля. Уравнения (5) – материальные уравнения (в их простейшей разновидности – линейная изотропная среда с локальными и мгновенными взаимодействиями – без дисперсии). Сторонние поля $E_{\text{стор}}$ могут быть включены в (5) или вставлены прямо в (1)–(4). Уравнение (6) выражает силу, действующую на свободные заряды и токи; через него осуществляется метрологическая связь с полями другой природы (механикой, гравитацией). Иногда (6) заменяется законом сохранения энергии, но тогда приходится делать оговорки, преждевременные на стадии постулирования общих законов движения.

Уравнения для полей (1)–(4) разбиваются на две пары: (1) и (4) выражают поля через их источники – электрические заряды и токи, а (2) и (3) источников не содержат, это автономная пара уравнений, определяющая связь между E и B , причем универсально, вне зависимости от материальных соотношений и от свойств источников. Так вот, источниковые уравнения (1) и (4) написаны Максвеллом сразу в "окончательном виде", принятом потом. Это, соответственно, (Е) и (J). В них скрыто содержится и уравнение непрерывности для токов проводимости (или конвекции)

$$\operatorname{div} \mathbf{j}^e + \frac{\partial \rho^e}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

Его Максвелл не вставляет в эту совокупность, что не означает, однако, что он не относит его к числу основополагающих. Более того, отсутствие в системе (А) – (γ) уравнения непрерывности, возможно, даже обусловлено вполне последовательными доводами: Максвелл считал его более общим, так сказать, надэлектродинамическим законом природы.

Другая автономная пара (2) и (3) представлена в "Трактате" иначе. Во-первых, Максвелл ввел в (В) проводящий контур, движущийся со скоростью u относительно других неподвижных элементов системы (среды), что позволило ему установить (так сказать, попутно, заодно) закон преобразования полей при переходе в движущуюся (инерциальную) систему отсчета (в нерелятивистском приближении, однако). Это и есть остаточный след модели. Его легко устранить, положив $u = 0$ (редкая ситуация, когда частный случай инициирует более общие соотношения!). Во-вторых, Максвелл не прибегнул к форме (2), (3), а как бы, опустив ее (возможно, даже и не заметив этого), сразу выдал решение: уравнения (2), (3) тождественно удовлетворяются, если представить E и B через потенциалы A , ϕ , рассматриваемые пока как произвольные функции координат и времени:

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi,$$

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}.$$

(8)

При $\mathbf{u} = 0$ (8) точно совпадают с (А) и (В). Фактически Максвелл вышел на соотношения (8) путем последовательных обобщений разных модельных ситуаций. Но тем сильнее, как нам кажется, мы должны проникнуться чувством преклонения перед таинственной силой (в смысле мощи интуиции) Великого Ума: Максвелл нашел функциональное решение уравнений, минуя сами уравнения, причем нашел в самом общем виде, и вдобавок в таком, который подсказал еще один, иной и по-иному содержательный подход к описанию электромагнитных полей вообще. Уравнения (2), (3) были явно выписаны О. Хевисайдом, и Дж. Дж. Томсон успел вставить их в примечания к 3-му изданию "Трактата".

Конечно, уравнения (1)–(4) и их прообразы в "Трактате" предполагают дифференцируемость всех встречающихся в них полей. Правда, каждому дифференциальному уравнению может быть поставлено в соответствие интегральное уравнение, где это ограничение на поля снимается. Максвелл отводил такому описанию (как уже отмечалось, обладающему большим сродством с полевыми представлениями Фарадея) важную роль в формировании науки, посвященной топологии векторных (а затем уже и тензорных любого ранга) полей (в отношении полей электромагнитных в этом деле еще и сейчас есть изрядные недоработки). Но, несмотря на большую общность, в сводном перечне уравнений в "Трактате" интегральная запись не фигурирует, а должны замечания по этому поводу рассеяны по разным разделам текста. Пока еще Максвелл искал принципиально правильные связи и только после получения доказательств их правильности должен был возникнуть следующий вопрос – установление наиболее общих правильных связей. А аппарат для решения этого вопроса был уже наготове. Более того, он включил в основную совокупность уравнений соотношение (К), которое мы интерпретируем сейчас как граничное условие – условие, определяющее закон перехода полей (в данном случае нормальных компонент D) через границу раздела сред (в данном случае через заряженную поверхность) и которое, строго говоря, вытекает из интегрального соотношения, обобщающего (4):

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi \int_V \rho dV,$$

где замкнутая поверхность S охватывает весь объем V . Таким образом, можно думать, что Максвелл временно отложил обсуждение вопроса о справедливости общих интегральных уравнений для электромагнитных

полей, и соответственно об общих условиях скачкообразного или непрерывного перехода разных компонент разных полей через резкие границы раздела сред.

Вторая группа уравнений, представляющая материальные связи, фактически не подвергалась никаким изменениям и выглядит вполне по-современному: (5) совпадает с (α) , (L) , (G) с точностью до обозначений. При этом Максвелл не ставил целью установление каких-то общих связей, ограничившись простейшими. Чуть позже он расширит возможные свойства сред, включив анизотропию (зависимость от направления) и оговорив дисперсию (зависимость от частоты). Важно отметить, что в этом простейшем наборе связей не сделано ни опущений, ни излишеств, а названо ровно столько соотношений, сколько необходимо для замыкания всей системы уравнений. Проблема замыкания и в наше время доставляет кое-какие беспокойства, так как для различных способов описания электромагнитных полей требуются разные независимые функции, причем одни из них могут быть вспомогательными ("скрытыми от измерений"), а другие физически адекватными измеряемым величинам. Система (1)–(4) содержит $3 \times 5 = 15$ скалярных величин, подлежащих определению; это компоненты векторов \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{H} , \mathbf{B} и \mathbf{j}^c (заряд ρ^c всюду, кроме идеальной электростатики, находится по известному распределению токов \mathbf{j}^c). Парные подсистемы (2), (3) и (1), (4) налагают каждая только по три (а не четыре!) связи на искомые векторы. В самом деле, из (2)–(3) шесть компонент векторов \mathbf{E} и \mathbf{B} выражаются через три компоненты \mathbf{A} и скаляр φ , но последние благодаря градиентной инвариантности еще допускают введение одной скалярной функции f , которой можно распорядиться произвольным образом. Напомним, что градиентной (или калибровочной) инвариантностью называется независимость векторов \mathbf{E} и \mathbf{B} относительно преобразования потенциалов

$$\mathbf{A}' \rightarrow \mathbf{A} - \nabla f, \quad \varphi' \rightarrow \varphi + \frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t}. \quad (9)$$

В результате система (1)–(4), содержащая 15 скалярных величин, фактически производит только шесть независимых ограничений первого порядка. И следовательно, для ее замыкания требуется еще девять связей: как раз именно столько выдают материальные соотношения (5).

Обращение к потенциалам, заметим, оказалось и здесь – при оценке условий замыкания системы уравнений поля – продуктивной необходимостью, так как без максвелловского представления (8) вряд ли возможно было установить инвариантное преобразование (9). В таком явном, окончательно оформленном виде оно не встречается в "Трактате", хотя в процессе выхода на уравнения (8) Максвелл неодно-

кратно обсуждает вопросы о неоднозначности введения скалярного и векторных потенциалов порознь.

Осталось обсудить наиболее трудное место, связанное с выводом выражения для механической силы (С). То, что в (С) наряду с членом, описывающим силу, действующую на токи, входит одновременно еще и член, соответствующий силе, действующей на фиктивные магнитные заряды, с помощью которых можно заменить (с известными оговорками) действие замкнутых токов, не должно приводить к недоразумениям: нужные пояснения сделаны в соответствующих параграфах "Трактата", относящихся к магнитостатике. Но обобщение равноправности такого подхода на произвольно текущие во времени процессы требует все же некоторых дополнений.

Поскольку магнитные заряды рассматриваются как вспомогательные величины, вводимые ради методических удобств, то не имеет смысла говорить и о плотности механической силы, действующей на них со стороны поля, как о величине физически измеряемой, однако можно утверждать, что суммарная (интегральная) сила, действующая на всю систему токов проводимости, будет совпадать с силой, действующей на эквивалентные им магнитные листы. Причем если в силе, действующей на токи, фигурирует вектор магнитной индукции, то в силе, действующей на магнитные заряды, "занят" вектор напряженности магнитного поля \mathbf{H} . По существу, это равносильно тому, что, так сказать, "будущий" принцип двойственности, т. е. принцип инвариантности уравнений поля относительно дуальной замены $\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{H}$, $\mathbf{H} \rightarrow -\mathbf{E}$, $\rho^e \rightarrow \rho^m$, $\mathbf{j}^e \rightarrow \mathbf{j}^m$, $\rho^m \rightarrow -\rho^e$, $\mathbf{j}^m \rightarrow -\mathbf{j}^e$, справедлив также и в своем силовом проявлении. Остается ли такая дуальность справедливой при воздействии на "реальные" магнитные монополи, если таковые все-таки будут найдены в природе, по-видимому, нельзя разрешить внутри собственно максвелловской электродинамики, а в прогностических теориях неоспариваемой ясности нет вплоть до настоящего времени.

Однако дуальность заведомо должна быть соблюдена при чисто абстрактном использовании магнитных зарядов, основанном на перепределении токовых источников поля по правилам (β): $\rho^m = -\operatorname{div} \mathbf{M}$, где \mathbf{M} – вектор намагничения, отыскиваемый как одно из возможных решений интегрального уравнения вида

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2c} \int_V \mathbf{j}^e_n \times r dV = \int_V \mathbf{M} dV,$$

что отвечает двум рецептам введения магнитного момента: для системы токов и для системы зарядов.

Таким образом, в выражении (С) нет излишеств, но приведено одновременно два выражения для силы, действующей на токи или на магнитные заряды в зависимости от предпочитаемого описания факти-

ческих источников магнитного поля. Однако, строго говоря, при зарядовом описании в уравнение (С) должен быть введен еще один член, связанный с появлением магнитных токов. Действительно, по смыслу введения магнитных зарядов в уравнения поля как источников этого поля (фиктивных или реальных) они должны удовлетворять закону сохранения, и, значит, любое изменение во времени плотности ρ^m сопровождается подтеканием или оттеканием магнитного тока (фиктивного или реального) с плотностью j^m :

$$\operatorname{div} j^m = -\frac{\partial \rho^m}{\partial t}. \quad (10)$$

Уравнение непрерывности (10) двойственно ($j^e \rightarrow j^m$, $\rho^e \rightarrow \rho^m$) уравнению непрерывности (7). И потому последовательный учет принципа двойственности в задаче о механическом действии электромагнитного поля на источники (строго говоря, конечно, на "носители источников") должен в общем случае дополнить (С) членом $\frac{1}{c} j^m \times D$.

И, наконец, последнее замечание, также относящееся к выражению (С). В той части силы, которая определяет воздействие поля на токи (строго говоря, конечно, на носители токов), Максвелл оперирует не с током проводимости, а с истинным током, дополнительно содержащим еще и ток смещения. Это отличает соотношение (С) от используемого нами теперь. Разница обусловлена несколько иным определением понятия силы (во-первых) и отсутствием еще одного члена, двойственного члену с электрическим током смещения (во-вторых). Поскольку вопрос представляет не только исторический интерес, остановимся на нем подробнее. Без ущемления сути дела в целях сокращения формул положим сразу $\epsilon = 1$, $\mu = 1$, т. е. будем рассматривать силы, действующие на заряды и токи в вакууме.

Закон сохранения импульса в этом случае принимает вид

$$\operatorname{div} \overleftrightarrow{T} - \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} = \mathbf{f}_{\text{мех}},$$

где

$$\mathbf{f}_{\text{мех}} = \rho^e \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{j}_{\text{пд}}^e \times \mathbf{H}, \quad \mathbf{g} = \frac{1}{4\pi c} \mathbf{E} \times \mathbf{H},$$

$$\overleftrightarrow{T} \rightarrow T_{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi} (E_\alpha E_\beta + H_\alpha H_\beta) - \frac{1}{8\pi} \delta_{\alpha\beta} (E^2 + H^2).$$

Здесь \mathbf{g} – плотность электромагнитного импульса, $T_{\alpha\beta}$ – тензор напряжения, дающий поток импульса (втекающий, а не вытекающий) внутрь объема, где находятся источники, отсюда и различие в знаках по срав-

нению с обычной записью законов сохранения. Соотношение (11) может быть переписано в несколько ином виде, если ввести понятие "обобщенной" силы, включающей в себя наряду с обычной механической (по нашей терминологии – лоренцевой) силой еще и изменение электромагнитного импульса

$$\begin{aligned} \overleftrightarrow{\operatorname{div}} T = \mathbf{f}_\Sigma = \mathbf{f}_{\text{мех}} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} = \rho^e \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{j}_{\text{п р}}^e \times \mathbf{H} + \\ + \frac{1}{c} \mathbf{j}_{\text{с м}}^e \times \mathbf{H} + \frac{1}{4\pi c} \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (12)$$

Сравнивая выражение для \mathbf{f}_Σ в (12) с максвелловской формулой (С) (где для однозначности подхода нужно сразу же положить $\rho^m = 0$), нетрудно обнаружить, что они отличаются только наличием дополнительного члена в (12)

$$\frac{1}{4\pi c} \mathbf{E} \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{c} \mathbf{j}_{\text{с м}}^m \times \mathbf{E}, \quad (13)$$

которому может быть придан вид, сходный с лоренцевым, если ввести условно "магнитный ток смещения":

$$\mathbf{j}_{\text{с м}}^m = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}.$$

Следовательно, формулы (11) или (12) допускают такую дуально симметричную запись:

$$\overleftrightarrow{\operatorname{div}} T = \mathbf{f}_\Sigma = \rho^e \mathbf{E} + \rho^m \mathbf{H} + \frac{1}{c} \mathbf{j}_{\text{п ол}}^m \times \mathbf{H} - \frac{1}{c} \mathbf{j}_{\text{п ол}}^e \times \mathbf{E}.$$

Причина отсутствия у Максвелла добавочного члена (13) отчасти раскрывается там, где он выводит выражение для механической силы, дифференцируя тензор напряжений (его магнитную часть), и проводит соответствующие обобщения на переменные во времени процессы. Воспроизведем это вычисление в наших обозначениях. Если в магнитостатике задан тензор $T_{\alpha\beta}^m = \frac{1}{4\pi} H_\alpha H_\beta - \frac{1}{8\pi} \delta_{\alpha\beta} H^2$, то его дивергенция равна

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{\alpha\beta}^m}{\partial x_\beta} &= \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x_\beta} H_\alpha H_\beta - \frac{1}{8\pi} \frac{\partial}{\partial x_\beta} \delta_{\alpha\beta} H^2 = \\ &= \frac{1}{4\pi} H_\beta \frac{\partial H_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{1}{4\pi} H_\alpha \frac{\partial H_\beta}{\partial x_\beta} - \frac{1}{8\pi} \nabla_\alpha H^2 = \\ &= \frac{1}{4\pi} (\mathbf{H} \nabla) H_\alpha + \frac{1}{4\pi} H_\alpha \operatorname{div} \mathbf{H} - \frac{1}{8\pi} \nabla_\alpha H^2. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь по дважды встречающимся индексам проводится суммирование

$$\beta\beta \rightarrow \sum_{\beta=1}^3.$$

Приняв во внимание тождество

$$\nabla \mathbf{H}^2 = 2(\mathbf{H}\nabla)\mathbf{H} + 2\mathbf{H} \times \text{rot } \mathbf{H},$$

можно соотношению (14) придать окончательный (для случая магнито-статике) вид:

$$\text{div } \overset{\leftrightarrow}{T}^m = -\frac{1}{4\pi} \mathbf{H} \times \text{rot } \mathbf{H} + \frac{1}{4\pi} \mathbf{H} \text{ div } \mathbf{H} = \frac{1}{c} \mathbf{j}_{np}^e \times \mathbf{H}. \quad (15)$$

Именно эта формула и приводится Максвеллом в п. 642–644. Обобщение состоит в замене $\mathbf{j}_{np}^e \rightarrow \mathbf{j}_{np}^e + \mathbf{j}_c^e$. Таким образом, уравнение (22) п. 644 подтверждает итоговое уравнение (С).

Однако в переменных полях соотношение (15) следует сложить с двойственным ему соотношением для электрической части тензора напряжений

$$\text{div } \overset{\leftrightarrow}{T}^e = \frac{1}{4\pi} \mathbf{E} \text{ div } \mathbf{E} - \frac{1}{4\pi} \mathbf{E} \times \text{rot } \mathbf{E} = \rho^e \mathbf{E} + \frac{1}{4\pi c} \mathbf{E} \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (16)$$

и в результате взамен максвелловской формулы (С) получить выражение (12).

Конечно, с помощью современного оперативного формализма, следуя Хевисайду, восстановление дуальной симметрии в выражении для силы (15) и (16) выглядит почти как очевидное. Но следует напомнить, что в "Трактате" вопрос о симметрии не обсуждался в столь общей постановке и, более того, его выяснение было отчасти затруднено отсутствием выписанного в явном виде уравнения (2). Вполне возможно, что это было причиной ненаписания последнего члена в (12) и (16).

Заметим в конце, что мы ограничились здесь комментированием только основных уравнений в их "итоговом" приведении (А) – (γ). Однако в тексте "Трактата" имеется несколько важных разбросанных замечаний, позволивших впоследствии обобщить эти уравнения на случай движущихся сред при наличии конвективных токов и т. д.

6. Незавершенность

Когда выстраивается новая система взглядов, охватывающая все явления, ранее считавшиеся независимыми, разрозненными, как-то несправедливо говорить о незавершенности монографии, где впервые дано

последовательное изложение основ теории и где не только установлены ее общие уравнения, но и приоткрыты тайны "феномена осенения" – скачка мысли в направлении, показавшемся сначала просто правильным, а потом оказавшемся единственно правильным. И все же в отличие от "Начал" Ньютона – а максвелловский "Трактат" может быть отнесен по некоторым критериям к следующей за ними вехе в истории познания мира (заметим, кстати, что по латыни они не "Начала", а "Принципы", т. е. главные положения) – в "Трактате" нет такого широкого панорамного разворота применений найденных уравнений. Максвелл прожил недолгую жизнь (1831–1879) и до самой кончины, даже в последней болезни, продолжал работать над "Трактатом", так что при других, более благоприятных, стечениях обстоятельств мы могли бы унаследовать от него второе издание "Трактата", как принято сейчас писать, полностью переработанное и улучшенное. Он, конечно же, не успел воспользоваться всеми плодами своих уравнений и в продвижении по "дедуктивному спуску" ограничился лишь некоторыми демонстрациями. Но это были впечатляющие примеры.

Прежде всего, уравнениям подчинились все законы электростатических, магнитостатических, стационарноточковых и квазистационарных полей, и стало возможным понять точность соответствующих приближений. Далее, Максвелл извлек из найденных им уравнений несомненно наиболее представительное решение для произвольно быстрого изменения полей во времени и пространстве – плоские электромагнитные волны в однородной среде, распространяющиеся со скоростью света и способные переносить энергию и импульс. Это был Триумф Великого Объединения – электричества, магнетизма и оптики, предсказанного еще Фарадеем. И как мы понимаем сейчас, такие решения можно воспринимать как фундаментальные; их суперпозиция (в линейном случае) дает любое распределение поля, удовлетворяющее уравнениям Максвелла, так что в известном смысле оба описания – через уравнения или через совокупность фундаментальных решений – эквивалентны. Наконец, Максвелл наметил схему объяснения "воздействия магнетизма на свет", т. е. фарадеевского эффекта вращения плоскости поляризации в замагниченной среде – прообраза будущих параметрических и нелинейных электромагнитных эффектов.

Среди максвелловедов (людей, изучающих не только особенности творения, но и свойства Творца) бытует несколько очевидных "эвристических недоразумений" типа "странно, что Максвелл не обратил внимания на ...". И ведь действительно странно, что он, получив электромагнитную волну для свободного значения частоты, ограничился только оптическими приложениями, ни словом не упомянув о возможности существования электромагнитных волн в более низко-

частотных диапазонах. По-видимому, и не нужно искать всему этому каких-либо особых объяснений. Прошло более 115 лет со времени выхода первого издания "Трактата", а исследования содержательности максвелловских уравнений не ослабевают. Максвеллу удалось проникнуть в одну из самых емких сокровищниц Природы, оценить масштабы богатств которой люди смогли только за несколько поколений. Освоить их одному смертному, даже такому великому и радивому, как Максвелл, было не по силам; тем более, еще не спало "волнение достижения" и еще оставалась известная неуверенность в исчерпывающей полноте найденных законов.

Поэтому если и имеет смысл обсуждать какую-то незавершенность "Трактата", то только в узком смысле, рабочую незавершенность, касающуюся отдельных вопросов, которые Максвелл по характеру предшествующего материала, казалось, должен был затронуть и замкнуть. Выше указывалось на них. Так, сходство структур электростатических и магнитостатических полей позволило Максвеллу подробнейшим образом проследить, как сопоставляются их математические описания и тем самым установить статический вариант принципа двойственности (иногда говорят, перестановочной двойственности, чтобы отойти от терминологического совпадения с дифракционным принципом Бабине). Естественно было бы завершить это сопоставление формулировкой общего принципа, что относительно быстро и случилось потом (Хевисайд, 1885–1891 годы), но понятно, что это произошло лишь после "восстановления" уравнения (2).

Вторая рабочая незаконченность относится к законам сохранения энергии, импульса и момента импульса. И здесь Максвелл еще в статических разделах "Трактата" отработывает многие тонкие моменты, связанные с этими понятиями, опираясь на них потом в обобщениях на быстропеременные поля, но все же последний шаг остался не сделанным, хотя математически любые законы сохранения могли быть сформулированы по типу уравнения непрерывности ($\operatorname{div} \mathbf{u} \rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$), так всесторонне (и модельно, и отвлеченно) разработанному в "Трактате" на примере закона сохранения электрического (7) и магнитного (10) зарядов.

Наконец, несколько слов о полях и потенциалах. Максвелл тщательно продумывал измерительную (метрологическую) сторону вопроса, связанного с введением электромагнитных полей, и мог высказаться по этому поводу после обсуждения уравнений электродинамики. Недаром же у него уравнение (С) для механической силы записано через поля, а не через потенциалы. Таким образом, он должен был выйти на утверждение об измеримости полей и вспомогательности потенциалов

в общем случае, тем более что опять же в статике и квазистатике эти моменты им не были опущены.

Возможно, что к перечню сему можно присоединить еще несколько обоснованных домыслов, например, об описаниях полей в движущихся системах отсчета, об обобщениях материальных уравнений и т. п. Однако и без того эти рассуждения выглядят несколько спекулятивно, т. е. основываются скорее не на доводах, а на отсутствии контрдоводов.

И все же особого замечания заслуживает вопрос об инвариантности уравнений относительно преобразований координат и времени. Максвелл был первым человеком, который придал установленным им законам Природы релятивистски инвариантный облик; однако он не акцентировал свое достижение, предоставив это сделать впоследствии другим (Фитцджеральд, Лоренц, Пуанкаре, Эйнштейн). Вообще говоря, преобразования, которые мы называем лоренцевыми, могли бы быть написаны еще в XVIII веке при изучении одномерного волнового уравнения (уравнения струны, например), но они наверняка рассматривались бы тогда, как некое забавное, чисто формальное свойство уравнения.

Поскольку максвелловские уравнения тоже приводят к волновым уравнениям для полей (или для потенциалов), то они в этом ограниченном смысле не дают фактического продвижения. Оно наступило после понимания того, что законы природы должны быть одинаковы во всех инерциальных системах отсчета, т. е. после упрочения убежденности в справедливости принципа относительности. И максвелловской электродинамике "повезло" в том смысле, что электродинамическая постоянная, совпавшая со скоростью света в вакууме, оказалась элитарно выделенной, предельно возможной среди всех других скоростей движения тел, и тем самым волновое уравнение для электромагнитных полей в вакууме тоже обрело свойство элитарной уникальности.

7. Заключение

В свое время в известной учебной книге по электродинамике (перевод на русский язык был осуществлен А. В. Гапоновым-Греховым и М. А. Миллером) американский физик Смайт написал, что он был бы благодарен всякому, указавшему способ устранения неточностей. И переводчики ответили ему тогда, что одним из лучших средств исполнения этого пожелания служит перевод книги на другой язык. Примерно так же обстоит дело и с любой другой научной продукцией. В частности, именно в процессе перевода "Трактата" нам удалось выяснить такие тонкости, которые при менее скрупулезном прочтении оригинала могли бы проскользнуть незамеченными.

Так что этот выпускаемый отдельным изданием обзор взглядов переводчиков "Трактата" (в значительной своей части перекрывающийся с Послесловием к переводу) следует, возможно, квалифицировать как сочинение об особенностях творческой психологии Максвелла, раскрываемых при тщательном изучении написанного им "Трактата об Электричестве и Магнетизме".

В конце мы приводим перечень некоторых известных нам монографий по максвелловской электродинамике на русском языке, где в той или иной степени восполнены еще и образовательные функции.

Монографии по максвелловской электродинамике на русском языке

1. *Лорентц Г. А.* Теория электромагнитного поля. М.: Гостехиздат, 1933.
2. *Лорентц Г. А.* Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. М.: Гостехиздат, 1956.
3. *Абрагам М., Беккер Р.* Введение в теорию электричества Максвелла // Теория электричества. М.: Гостехиздат, 1939.
4. *Беккер Р.* Электронная теория // Теория электричества. М.: Гостехиздат, 1941. Т. 2.
5. *Планк М.* Теория электричества и магнетизма // Введение в теоретическую физику. М.: ГГТИ, 1933. Ч. 3.
6. *Зоммерфельд А.* Электродинамика. М.: ИЛ, 1958.
7. *Стрэттон Дж.* Теория электромагнетизма. М.: Гостехиздат, 1948.
8. *Смайт В.* Электростатика и электродинамика. М.: ИЛ, 1954.
9. *Поль Р. В.* Учение об электричестве. М.: Физматгиз, 1962.
10. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Электричество и магнетизм. Физика сплошных сред // Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1966. Т. 5-7.
11. *Парселл Э.* Электричество и магнетизм // Берклеевский курс физики. М.: Наука, 1983. Т. 2.
12. *Джексон Дж.* Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965.
13. *Пановский В., Филипс М.* Классическая электродинамика. М.: Физматгиз, 1963.
14. *Рамо С., Уиннери Дж.* Поля и волны в современной радиотехнике. М.: Гостехиздат, 1950.
15. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. Электродинамика сплошных сред // Теоретическая физика. М.: Наука, 1973. Т. 2; 1982. Т. 8.

16. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. М.: Наука, 1976.
17. *Власов А. А.* Макроскопическая электродинамика. М.: Гостехиздат, 1955.
18. *Вайнштейн Л. А.* Электромагнитные волны. М.: Сов. радио, 1957; Второе изд. М.: Радио и связь, 1988.
19. *Семенов А. А.* Теория электромагнитных волн. М.: Изд-во МГУ, 1962.
20. *Говорков В. А.* Электрические и магнитные поля. М.: Госэнергоиздат, 1960.
21. *Никольский В. В.* Теория электромагнитного поля. М.: Высш. шк., 1964.
22. *Федоров Н. Н.* Основы электродинамики. М.: Высш. шк., 1965.
23. *Кацелененбаум Б. З.* Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966.
24. *Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В.* Электромагнитные поля и волны. М.: Сов. радио, 1971.
25. *Вольман В. И., Пименов Ю. З.* Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971.
26. *Баскаков С. И.* Основы электродинамики. М.: Сов. радио, 1973.
27. *Никольский В. В.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973.
28. *Иваненко Д. Д., Соколов А. А.* Классическая теория поля. М.: Гостехиздат, 1951.
29. *Гринберг Г. А.* Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.: Изд-во АН СССР, 1948.
30. *Ампер А. М.* Электродинамика. Сб. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1948.
31. *Де Гроот С. Р., Сатторп Л. Г.* Электродинамика. М.: Наука, 1982.
32. *Тонелла М. А.* Основы электромагнетизма и теория относительности. М.: ИЛ, 1962.
33. *Новаку В.* Введение в электродинамику. М.: ИЛ, 1963.
34. *Скиллинг Г. Г.* Введение в теорию электромагнитных волн. М.: Связьиздат, 1947.
35. *Френкель И. Я.* Электродинамика (общая теория) // Собр. избр. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1956. Т. I.
36. *Савельев И. В.* Механика. Электродинамика // Основы теоретической физики. М.: Наука, 1975. Т. I.
37. *Семенов А. А.* Введение в электродинамику излучающих систем. М.: Изд-во МГУ, 1963.
38. *Марков Г. Т. и др.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1979.

39. *Матвеев А. Н.* Электродинамика. М.: Высш. шк., 1980.
40. *Матвеев А. Н.* Электродинамика и теория относительности. М.: Высш. шк., 1964.
41. *Хайкин С. Э.* Электромагнитные колебания и волны. М.: Госэнергоиздат, 1959.
42. *Новожилов Ю. В., Яппа Ю. А.* Электродинамика. М.: Наука, 1978.
43. *Семенов Н. А.* Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973.
44. *Терлецкий Я. П., Рыбаков Ю. П.* Электродинамика. М.: Высш. шк., 1980.
45. *Кузнецов Б. Г.* Эволюция основных идей электродинамики. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
46. *Поливанов К. М.* Электродинамика движущихся тел. М.: Энергоиздат, 1982.
47. *Иродов И. Е.* Основные законы электромагнетизма. М.: Высш. шк., 1983.
48. *Красюк Н. П., Дымовин Н. Д.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высш. шк., 1974.
49. *Туров Е. А.* Материальные уравнения электродинамики. М.: Наука, 1983.
50. *Покровский С. И.* Электричество и магнетизм. М.: ГТТИ, 1933. Ч. 1.; 1935. Ч. 2.
51. *Стражев В. И., Томильчик Л. М.* Электродинамика с магнитным зарядом // Наука и техника, 1975.
52. *Дучков В. М.* Электродинамика: История и методология макроскопической электродинамики. М.: Высш. шк., 1975.
53. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры. М.: Мир, 1977.
54. *Фрадкина Э. М.* Лекции по курсу «Теория Максвелла и электромагнитные волны». М.: МАИ, 1971.
55. *Фредерикс В. К.* Электродинамика и введение в теорию света. Л.: Кубуч, 1934.
56. *Рудаков В. Н.* Теория электромагнитного поля (в 3 ч). Л.: Электротехн. ин-т им. В. И. Ульянова (Ленина), 1971.
57. *Фальковский О. И.* Техническая электродинамика. М.: Связь, 1978.
58. *Бейтмен Г.* Математическая теория распространения электромагнитных волн. М.: Физматгиз, 1958.
59. *Медведев В. В.* Начала теоретической физики. М.: Наука, 1977.
60. *Ахиезер А. И., Ахиезер И. А.* Электромагнетизм и электромагнитные волны. М.: Высш. шк., 1985.
61. *Фушич В. И., Никитин А. Г.* Симметрия уравнений Максвелла. Киев: Наук. думка, 1983.

Содержание

М. А. Миллер. Предисловие — 3

У. Нивен. Жизнь и научная деятельность Дж. К. Максвелла
В переводе М. Л. Левина — 7

М. Л. Левин, М. А. Миллер, Е. В. Суворов. Особенности
максвелловского "Трактата об Электричестве и Магнетизме"
и принципы научного перевода — 31

Монографии по максвелловской электродинамике
на русском языке — 63