



Изв. вузов «ПНД», т. 7, № 5, 1999

УДК 537.8(09)

**ОСОБЕННОСТИ МАКСВЕЛЛОВСКОГО
«ТРАКТАТА ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ И МАГНЕТИЗМЕ»
И ПРИНЦИПЫ НАУЧНОГО ПЕРЕВОДА***

М.Л. Левин, М.А. Миллер, Е.В. Суворов

*«War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb!»
Goethe. «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 книгоцеев. 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 предьявляет себя для диагностических заключений о нем самом. Так что обсуждение особенностей перевода фактически пересекается с изучением 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

* © Приложение к переводу максвелловского «Трактата об Электричестве и Магнетизме». Н.Новгород: ИПФ РАН, 1998. 68 с.

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 отгалкивающее неприятие вскоре сменилось 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:

«*Was 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.

Goethe:

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 дозволяя 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 первозданный, 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 непосягательства 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, вводил 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 переучения 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 приравниваться.

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 ему более модельный оттенок. То же самое несоответствие наличествует и в случае заряженного объема, 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 равнообразный синоним – без альтернатив). Ему соответствует 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 разнобоя, 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 разнослова 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 сборка 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 наблюдениям 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 (этими словами здесь и далее мы оперируем несколько упрощенно и скорее в целях обозначений, а не характеризования, т. е. отнюдь не утверждая, что индуктивные и дедуктивные приемы так категорично принесены 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, отталкиваясь 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 воплощением. На опыте динамики можно было основывать методiku создания и других динамико-подобных (тоже максвелловский оборот) наук: наикратчайшими путями выходить на наибообщие законы, которые затем анализировать и сопоставлять с наблюдениями 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 создателей (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 естественно проистекающий 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 удобным 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 прославившийся 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 состояние 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, принадлежат сами к странному («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, Грином, 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 вызывает 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 электричества, 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 , характеризуемой 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 $ij = k = -ji$, $jk = i = -kj$, $ik = -j = -ki$.

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 установить правила не только сложения, но и умножения векторов, а следовательно, открывала путь к построению векторного дифференциального исчисления. Действительно, если рассматривать векторное поле \mathbf{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 $\alpha\alpha = \sum_{\alpha=1}^3$), 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 отнесение 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 вслед за Гамильтоном, вводит оператор дифференцирования $\nabla = i\partial/\partial x_1 + j\partial/\partial x_2 + k\partial/\partial x_3$. 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 ($\nabla \cdot \phi$), ротор, или вихрь вектора,

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

и конвергенция (равная дивергенции с обратным знаком)

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

а также соответствующие операции второго порядка, важнейшая из которых,

$$\nabla \cdot \nabla \varphi = - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha},$$

эквивалентна «нашему» лапласиану с противоположным знаком.

Важность этого математического языка несомненна. Без него уравнениям 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 критериев 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 линии, «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

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

(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 линиеподобных 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 не просто 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 отталкиваться 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, приглушает 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 общезначения этого достижения. Ведь фактически этим был проторен путь познания любого вида взаимодействия, для осторожности скажем, неживой природы.

Руководствуясь разумными доводами (например, поведением 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.

(Окончание следует)