

Ф. Клейн

**Лекции о развитии
математики в XIX столетии**

Часть 1

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 51
ББК 22.1
Ф11

Ф11 **Ф. Клейн**
Лекции о развитии математики в XIX столетии: Часть 1 / Ф. Клейн – М.:
Книга по Требованию, 2012. – 438 с.

ISBN 978-5-458-28798-2

Книга «Лекции о развитии математики в XIX столетии» написана немецким математиком и педагогом Феликсом Христианом Клейном. В предлагаемой вниманию читателя книге Клейн уделяет много внимания своим работам и развитию тех идей, которые были особенно близки ему в его творчестве. Данная работа не была доведена Клейном до конца, в ней остаются значительные пробелы, наличие которых обусловливается обстоятельствами, от автора не зависевшими. Тем не менее, она представляет собой исключительный интерес. При чтении ее перед нами развертывается настоящая панорама, на которой ясно различаются большие дороги развития науки и рельефно показаны отдельные фигуры и группы людей, прокладывавших эти дороги.

ISBN 978-5-458-28798-2

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

**Развитие алгебраической геометрии после Мебиуса,
Плюкера и Штейнера.**

Введение	168
<i>Создание чисто проективной геометрии</i>	168
Штаудт	169
Определение общих проективных координат	170
Интерпретация мнимых чисел в проективной геометрии	173
Паль и его школа	177
Исторические интересы	179
Построение учения о сферической окружности	180
Пример. Конфокальные поверхности второго порядка	182
Кели	184
Общее проективное мeroопределение	186
Проективное обоснование системы геометрии. Неевклидова геометрия. Клейн. Бельтрами. Клиффорд	188
II. Параллельное развитие алгебры. Теория инвариантов	198
Зарождение теории и основные линии развития	198
Якоби	194
Гессе	197
Пример. Точки перегиба плоской кривой n -го порядка	198
Кели и Сильвестр	200
Сальмон	202
Заключительные замечания к теории форм	208
Отдельные интересные задачи	204
III. Пространство n-измерений и обобщенные комплексные числа	206
Противодействие и недоразумения	207
Спириты	208
Построение и применение теории. Лагранж. Коши. Кели	209
Плюкер	210
Риман	210
Грасман	212
Учение о протяженности	214
Аксиоматика арифметики. Высшие комплексные числа	217
Специальные исследования	219
Проблема Пфаффа	219
Линейные построения	220
Грасманианцы	221
амильтон	222
Кватернионы. Интерпретация их как вращательного растяжения пространства	223
Критика. Исчисление матриц Кели	229
ГЛАВА ПЯТАЯ.	
Механика и математическая физика в Германии и Англии до 1880 года.	
I. Механика	232
Экскурс в классическую механику	233
Работы Гамильтона по оптике и механике	235
Системы лучей	235
Коническая рефракция	236
Характеристические функции и принципы варьирующего действия	237

Оптика	238
Судьба работ Гамильтона на континенте	239
Система лучей Куммера	241
Механика	242
Канонические дифференциальные уравнения	244
Работы Якоби по механике	244
Канонические переменные. Ведущая функция	245
Методы интегрирования канонических дифференциальных уравнений	247
Рут	249
Об английской системе преподавания	250
Циклические системы	251
Кинетическая теория материи	252
Приложение: экскурс в механическую теорию теплоты	254
П. Математическая физика	257
Франц Нейман и Кенигсбергская школа	258
Кристаллография, оптика и электродинамика Неймана	260
Кирхгоф	261
Спектроскопия, механика и теория теплового излучения	262
Развитие математической физики в Берлине	263
Берлинское физическое общество	264
Гельмгольц	265
Натурфилософия. Теорема о сохранении энергии	267
Гидродинамика. Теория вихрей	269
Развитие физики в Англии	272
Грин, Мак Кэллох	273
Стокс, В. Томсон	274
Метод электрических изображений и термодинамика	277
Геофизика и мореходное дело	277
Вихревая теория материи	278
Приложение: „Трактат“ Томсон-Тэта	279
Максвелл	280
Электромагнитная теория света	281
Отношение к механике. Гиббс	284
Связь с уравнениями Мак Кэллоха	285
Характеристика Максвела	287
 ГЛАВА ШЕСТАЯ.	
Общая теория функций комплексного перемененного у Римана и Вейерштрасса.	
I. Бернгард Риман	289
Общий обзор его деятельности	289
Основные идеи римановой теории функций	295
Понятие аналитической функции	298
Идея римановой поверхности	299
Связь с математической физикой	301
Методы доказательства — принцип Дирихле	304
Принцип Дирихле у Римана	305
Критика Вейерштрасса	306
Шварц и новое обоснование принципа	307
Клейн, Гильберт	309
Теория линейных дифференциальных уравнений n -го порядка	310
Группа монодромии	311
Гипергеометрический ряд	311
Фукс	312
Проблема Римана	313

Распространение идей Римана	314
Гиперэллиптический и ультраэллиптический случай	315
Нейман Клейбш	316
Казорати. Дедекиннд. Вебер. Неттер. Виртингер	316
Клейн. Пуанкаре	318
Заключительные замечания	318

П. Карл Вейерштрасс	319
Общий обзор его деятельности	319
Якоби и Гудерман	320
Функции A_1 и σ	321
Общая программа Вейерштрасса до 1854 г.	323
Лекция Вейерштрасса. Построение теории	326
Основные идеи теории функций Вейерштрасса	328
Теория эллиптических функций	331
Включение в теорию степеней	331
Эйзенштейн. Гаусс	332
Распространение идей Вейерштрасса	333
Эрмит	334
Абелевы функции	335
Софья Ковалевская	336

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

**Исследование природы алгебраических многообразий
с более глубокой точки зрения.**

I. Дальнейшее развитие алгебраической геометрии	339
Теория плоских алгебраических кривых	339
Влияние Римана	340
Клейбш и его школа	341
Случай плоской кривой C_3 и теорема Абеля	343
Биравиантное преобразование кривых	345
Случай произвольной кривой C_n	347
Однородные переменные	348
Клейбш и Гордан. Бриль и Неттер	352
Теорема Римана — Роша	353
Нормальная кривая	354
Дальнейшее развитие теории абелевых функций	357
Теория алгебраических кривых в пространстве и алгебраических по- верхностей	358
Кривые на однополостном гиперболоиде	363
II. Теория целых алгебраических чисел и связь ее с теорией алгебраических функций	364
Начала теории. Куммер	366
Обобщения Кронекера и Дедекинда. Идеалы	369
Аналогия с теорией функций. Дедекиннд. Вебер. Вейерштрасс	373
Дальнейшие судьбы теории. Дедекиннд-Вебер. Гурваз. Гильберт. Минковский	374
Теория алгебраических форм Гильберта	377
Теория чисел Гильберта. Экскурс в теорию Галуа	378

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

Теория групп и теория функций. Автоморфные функции.	
I. Теория групп	382
Основные понятия	382
Исторический обзор. Группы перестановок и теория уравнений	383
Лагранж. Галуа. Жордан	384
Конечные группы линейных подстановок. Правильные многогранники	386
Дальнейшее развитие исследований. Применения к кристаллографии	391
II. Автоморфные функции	398
Теория групп и теория функций	398
Связь с теорией групп и линейными дифференциальными уравнениями второго порядка	394
Экскурс о гипергеометрическом ряде	395
Переход к группам линейных подстановок	396
Конформное отображение и принцип симметрии	397
Связь с правильными многогранниками	398
Икосаэдр	399
Решение уравнения пятой степени	404
Эллиптические модулярные функции	408
Исторический обзор	412
Гаусс. Риман	412
Абель. Якоби. Эрмит	413
Преобразования эллиптических функций. Галуа. Эрмит	414
Общая программа	415
Главная конгруэнция пятой и седьмой степеней	416
Центральная теорема об автоморфных функциях	421
Пуанкаре	423
Именной указатель	431

ФЕЛИКС КЛЕЙН И ЕГО ИСТОРИЧЕСКАЯ РАБОТА.

М. Я. ВЫГОДСКИЙ.

Недавно исполнилось десять лет со дня смерти Клейна. Уже одному этому было бы уместно предпослать переводу работы Клейна «Развитие математики в XIX столетии» краткий обзор его многосторонней деятельности. Но и помимо этого внешнего повода полутораковая научная и общественная деятельность Клейна заслуживает того, чтобы уделить ей должное место в истории математики XIX столетия, тем более что влияние идей и произведений Клейна и сейчас еще очень велико.

В своей книге, ныне предлагаемой вниманию советского читателя, Клейн уделяет много внимания своим работам и развитию тех идей, которые были особенно близки ему в его творчестве. Можно даже сказать, что вся его работа написана под углом зрения личных научных интересов. Но систематического изложения своей биографии Клейн, руководясь, пожалуй, чувством скромности, не дает, и потому в его книге ощущается несомненный пробел, который я хотел бы заполнить хотя бы отчасти. С другой стороны, достоинства и недостатки исторической работы Клейна будут для нас яснее и понятнее, если мы предварительно хотя бы в самых общих чертах характеризуем жизнь и творчество автора.

Феликс Клейн родился в 1849 г. в семье чиновника: отец его был казначеем в Дюссельдорфе. Это был человек чрезвычайно консервативного образа мышления; в семье Клейна господствовал «старо-прусский» дух, и в этом духе был воспитан и Феликс Клейн. В гимназии, в которую определил его отец, царил классический стиль; естествознанию и математике уделялось очень малое место в преподавании. Уже с юношеских лет Клейн стал проявлять стремление к разностороннему и углубленному изучению мира, и узкая программа гимназии не могла его удовлетворить. Он обращается к самообразованию, а по окончании гимназии в 1865 г. поступает в университет в Бонне для специального изучения естествознания и математики.

На талантливого студента Клейна сразу обратил внимание профессор Боннского университета Плюккер. В то время уже глубокий старик, Плюккер занимал одновременно кафедры математики и физики. Наряду с чисто математическими исследованиями, преимущественно в области геометрии, в которой имя его связано с целым рядом плодотворных идей, и поныне сохранивших свою актуальность («плюккеры координаты», идея

метрической двойственности, линейчатая геометрия и др.), Плюкер был талантливым экспериментатором и сделал выдающиеся открытия в различных отделах физики, значительная часть которых, правда, не получила должной оценки у современников.

Понятно, насколько соответствовали интересам молодого Клейна научное руководство Плюкера и личное общение с ним. В свою очередь, и Плюкер был заинтересован в помощи молодого Клейна, и в 1866 г. Клейн становится ассистентом Плюкера по кафедре физики.

В 1868 г. Плюкер умер, и на девятнадцатилетнего Клейна пала задача подготовить к печати оставшиеся не вполне отделанными работы Плюкера, в частности вторую часть его замечательного сочинения «Новая геометрия пространства, основанная на рассмотрении прямой линии как элемента пространства». В 1869 г. эта работа уже вышла из печати. Отсюда берет свое начало и самостоятельная работа Клейна в области геометрии. Прошло еще каких-нибудь два-три года, и Клейн уже оформил тот круг идей, который определил всю дальнейшую его научную работу.

После смерти Плюкера Клейн оставил Бонн и в течение следующего года побывал в Геттингене и в Берлине, где имел возможность войти в личное общение с выдающимися учеными, возглавлявшими влиятельные научные школы: в Геттингене он познакомился с Клебшем (1833—1872) и Вильгельмом Вебером (1804—1890), а в Берлине — с Вейерштрассом (1815—1897).

Чрезвычайно интересно для характеристики самостоятельности молодого Клейна то обстоятельство, что с первыми двумя из вышеназванных лиц Клейн вступил в тесный научный и личный контакт, тогда как при первых же попытках общения с Вейерштрассом обнаружилась непроходимая пропасть, отделявшая научное мировоззрение молодого математика от мировоззрения главы берлинской математической школы.

Оба геттингенских профессора — сравнительно молодой математик Клебш и уже достигший шестидесятипятилетнего возраста физик Вебер, в молодости бывший ассистентом Гаусса, — были носителями традиций математики эпохи французской революции. Математика являлась для них составной и нерааздельной частью науки о природе, не только в том смысле, что они сами искали и находили многочисленные применение математики, но и в том, что в чисто математическом исследовании они не покидали почвы конкретных образов геометрии, механики и физики. Что касается Вейерштрасса, то для него мир математических наук был замкнутым в себе миром чистой абстракции, его творчество покоилось на педантично-строгом логическом анализе аналитических соотношений; на приложения же математики он смотрел как на нечто побочное, для самой математики несущественное.

Как ни велик был авторитет Вейерштрасса в конце 60-х годов прошлого века, он не только не оказал никакого воздействия на образ мышления молодого Клейна, но, напротив, заострил его на-

учное крепло и поставил Клейна в резкое оппозиционное отношение к школе Вейерштрасса.

В 1870 г. Клейн познакомился с Софусом Ли, и это знакомство оказало на Клейна большое влияние: знаменитый норвежский математик ввел Клейна в круг своих идей, и с тех пор между Клейном и Ли (который был старше его на семь лет) не прекращался личный и научный контакт. В первый же период их знакомства этот контакт дал плодотворные результаты для развития новой области математики, в настоящее время включившей в себя ряд разрозненных прежде областей — абстрактной теории групп. И Клейн был первым, кто подчинил понятию группы столь обширную область математики, какой является геометрия.

В том же 1870 г. Клейн совместно с Ли предпринимает поездку в Париж, где вступает в личную связь с Дарбу и Жорданом. Франко-пруссская война заставила Клейна покинуть Францию. В войне Клейн не принимал никакого участия, так как в самом ее начале заболел тифом. Оправившись от последствий тяжелой болезни, он вновь поселяется в Геттингене. Высоко ценивший таланты Клейна Клебш выхлопотал ему вскоре самостоятельное академическое положение, и двадцати трех лет от роду Клейн становится профессором математики в Эрлангене (1872).

К этому времени идеи Клейна уже вполне оформляются, и его работа «*Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen*» («Сравнительное рассмотрение новых геометрических исследований», октябрь 1872 г.) дает настолько ясную и отчетливую перспективу дальнейшего развития геометрии, что она по праву получила в обиходе математиков название «Эрлангенской программы». В течение полутора столетий тезисы Эрлангенской программы были ведущим началом в развитии математики, да и поныне, хотя математика обогатилась рядом новых плодотворных идей, делающих в некоторых отношениях Эрлангенскую программу превзойденной, она продолжает оставаться не только важнейшим историческим документом, но и живым источником математического творчества.

Основная идея Эрлангенской программы состоит в том, что объектом геометрии является система инвариантов некоторой группы преобразований непрерывного многообразия и что различные системы геометрии отличаются друг от друга постольку, поскольку отличны структуры положенных в их основу групп.

Эта идея, в настящее время легко доступная каждому математику, отнюдь не была таковой 60 лет тому назад, несмотря на то, что понятия, на которые она опирается, каждое в отдельности уже стали достоянием науки. Действительно, понятие группы было введено в математику уже Лагранжем, а в руках Галуа оно получило плодотворное применение в общей теории алгебраических уравнений. Незадолго до появления Эрлангенской программы теория групп подстановок была систематически изложена Жорданом, книга которого «*Traité des substitutions*» (1870) представляет собой первый учебник теории конечных групп. Идея

единства геометрических систем, представляющих различные интерпретации одной и той же системы метрических соотношений, содержалась уже в работе Бельтрами (1868), в которой была дана интерпретация плоской неевклидовой геометрии как геометрии псевдосферы в евклидовом пространстве; наконец, теория алгебраических инвариантов вместе с ее приложением к аналитической геометрии была в течение 1850—1870 гг. развита рядом авторов, между прочим Кели и Клебшем. В частности, Кели выдвинул идею подчиненности метрической геометрии (евклидового пространства) геометрии проективной и ввел проективное мeroопределение, основанное на рассмотрении алгебраических квадратичных форм.

Может показаться, что при этих обстоятельствах идеи Эрлангенской программы не содержали ничего нового и что оставалось только сформулировать их во всей полноте, чтобы они были приняты как нечто само собой разумеющееся. Что такое представление было бы в корне ошибочно, показывает лучше всего тот прием, который встретили идеи Клейна со стороны многих видных математиков.

Из работы Клейна, перевод которой здесь дается, читатель увидит, что первый прием, оказанный его идеям, был не только холодно-равнодушным, но и сопровождался прямым сопротивлением со стороны такого, например, математика, как Вейерштрасс. Я не буду воспроизводить соответствующее место, — читатель найдет его на стр. 189—192. Я замечу лишь, что причиной непонимания, проявленного Вейерштрассом, было не только различие психологий, как полагает Клейн; несомненно здесь имело значение также и другое, и притом более существенное, обстоятельство.

Я уже говорил о том стремлении к многостороннемухвату действительности, которое характерно для Клейна; оно проявилось, быть может, всего сильнее именно в данном случае, когда Клейн осознал единство в многообразии математических фактов и методов, на первый взгляд весьма далеких друг от друга. Здесь мы имеем яркий пример того, как крупнейший мыслитель в своем творчестве стихийно становится на позиции диалектического материализма, — факт, всегда подчеркивавшийся основоположниками марксизма. То сопротивление, которое встретили идеи Клейна, имеет своей более глубокой причиной общую ограниченность мировоззрения буржуазного ученого, оно представляет собой проявление метафизического образа мышления, не раз служившего в истории науки препятствием к усвоению новых идей: вспомним хотя бы те трудности, которые встретила неевклидова геометрия или — в более близкое к нам время — теория относительности.

Идеи Эрлангенской программы представляют собой очень высокую ступень математической абстракции. Они уносят мысль математика далеко от тех «физических» объектов, с которыми в элементарной геометрии связываются основные геометрические понятия. Они предоставляют стороннику «чистого мышления» «областьительную возможность покинуть вовсе область конкрет-

ного, объявив, что физическая интерпретация геометрии не входит в компетенцию математика. Ничто не было более чуждо Клейну, чем эта тенденция отграничения области математики от области технической практики. Он умел соединять подъем на высоты абстракции с яркостью образного геометрического и физического мышления.

Так, в руках Клейна риманова «геометрическая» теория функций комплексного переменного получила не только геометрическую, но и физическую интерпретацию. С большой степенью вероятности можно утверждать, что уже сам Риман исходил из тех же соображений, которые развел, опираясь на работы Римана, Клейн, но лишь Клейн, не страшась упреков в нарушении чистоты метода, привлек «открыто» физические соображения к решению чисто математических вопросов. Уже задолго до Клейна была известна та роль, которую уравнения Коши-Римана, а чадовательно, и вся теория функций комплексного переменного играли в теории потенциала и теории теплоты. Но до Клейна эти физические теории были лишь полем применения математической физики. Клейн привлек их на помощь для создания «физической математики». В самых общих чертах строй мыслей Клейна в этом направлении обрисован им в «Развитии математики в XIX столетии» (см. стр. 296); рамки настоящей статьи не позволяют входить в большие подробности, но уже сказанного достаточно, чтобы показать, что взору Клейна было доступно раскрытие не только внутренних связей между отдельными ветвями математики, но и двустороннего взаимодействия между математикой и физикой. И здесь мы также видим наличие диалектического элемента, ярко окраинивающего все творчество знаменитого германского математика.

Вернемся, однако, к биографии Клейна. За появлением Эрлангенской программы следует интенсивнейшая научная работа Клейна в целом ряде областей математики. Лишь часть своей боевой продукции Клейн опубликовал немедленно, и все же за три года (1872—1875) им было опубликовано более 20 научных работ. Его внимание в этот период привлекают особенно вопросы неевклидовой геометрии, теории непрерывных групп, теории алгебраических уравнений и теории эллиптических функций. К этому времени относятся и первые работы Клейна по теории икосаэдра и ее применение к теории алгебраических уравнений пятой степени.

В 1875 г. Клейн покинул Эрланген, чтобы занять место профессора Мюнхенской высшей технической школы. Здесь Клейн вел большую педагогическую работу. Он, не ограничиваясь чтением общего курса математики, читал лекции, знакомившие слушателей, интересовавшихся математикой, с более специальными вопросами, далеко выходившими за пределы обязательного курса. Наряду с этим Клейн продолжает вести напряженную исследовательскую работу: примиущество его внимание занимает созданная им в связи с теорией икосаэдра теория автоморфных функций; подробно об этих своих работах сообщает сам Клейн в

посвященной специально автоморфным функциям главе VIII «Развития математики в XIX столетии».

Эти работы Клейн продолжает и в течение первых лет своего пребывания в Лейпциге, куда он переехал из Мюнхена в 1880 г. и где он получил университетскую кафедру геометрии. Эти годы были годами наибольшего напряжения научного творчества Клейна. Напряжение это не прошло безнаказанным для его здоровья: в 1882 г. от переутомления Клейн тяжело заболел. Хотя болезнь и не отразилась на количественных показателях его продукции, однако преждевременно вызвала резкое падение его творческих сил.

Деятельная натура Клейна нашла себе теперь иной выход и проявилась в организационной, педагогической, литературной и общественной деятельности, поражающей своей продуктивностью. На этих поприщах Клейном были созданы ценности, не только не уступающие по своему историческому значению ценности его специальных работ, но, пожалуй, еще более значительные.

В промежутке между 1882 и 1898 гг. были изданы монографии Клейна, в которых синтетически излагались методы и результаты его обширных исследований. Так, в 1882 г. появилась «Риманова теория алгебраических функций и их интегралов», в 1888 г. — «Об икосаэдре и решении уравнения пятой степени», в 1890 г. — «Теория эллиптических модулярных функций» (совместно с Фрике), в 1897 г. — первая часть «Теории автоморфных функций» (совместно с тем же автором; эта работа была закончена выходом третьей части в 1912 г.); наконец в 1898 г. совместно с Зоммерфельдом Клейн выпустил первую часть своего фундаментального сочинения по теории волчка; последняя, четвертая, часть его вышла в 1910 г.

В 1886 г. Клейн переезжает в Геттинген, который становится постоянным его местопребыванием до конца жизни. Здесь он с жаром отдаётся педагогической работе; избавленный от чтения основных обязательных курсов (их читал в Геттингенском университете Шварц), Клейн ведет в течение ряда лет факультативные курсы по самым разнообразным областям и вопросам, начиная от теории чисел и кончая технической механикой. И каждый из этих курсов блещет мастерством изложения, глубиной и оригинальностью постановки вопросов и, главное, многосторонностью связей, ведущих от одних вопросов науки к другим, казалось бы, совершенно особо стоящим.

Лекции Клейна привлекали многочисленных слушателей, съезжавшихся в Геттинген буквально со всех концов света. Многие из этих лекций, тщательно записанные, в течение ряда лет издавались сначала литографским способом, а затем и типографским. Эти книги, а также приватные записи лекций читались и перечитывались несколькими поколениями математиков, и много имеется таких математиков, которых могут назвать себя, — прямо или косвенно через своих учителей, учениками Клейна.

В этих лекциях ярче всего проявляются синтетические тенденции Клейна; имея в виду показать научную дисциплину в ее це-