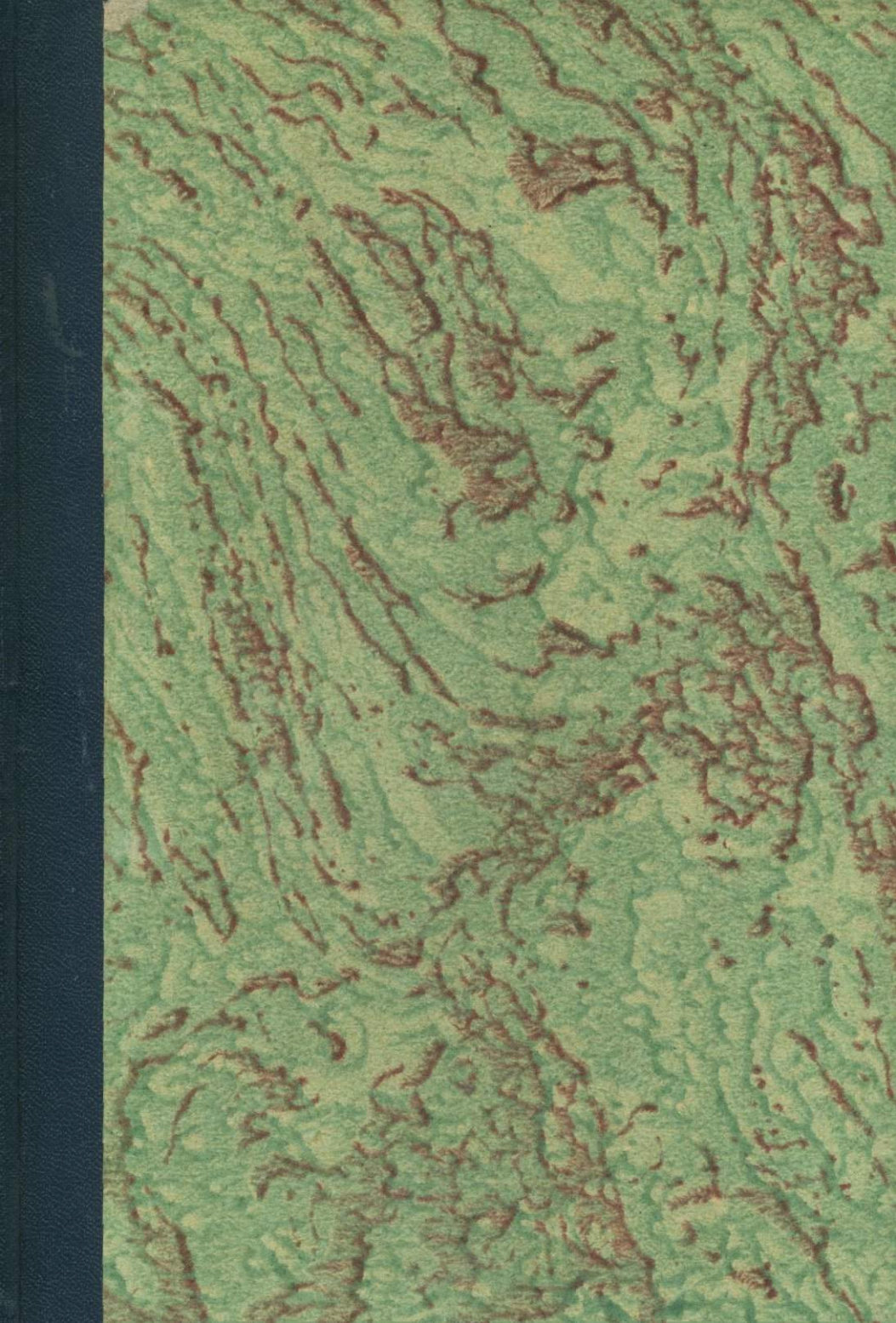




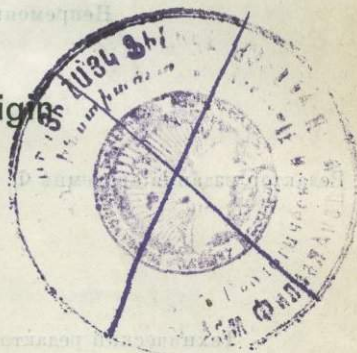
552.3
Λ-36

Акад. Ф. Ю. ЛЕВИНСОН-ЛЕССИНГ

Проблема генезиса магматических пород и пути к ее разрешению

F. LOEWINSON-LESSING

The problem of the origin
of magmatic rocks



Напечатано по распоряжению Академии Наук СССР
Сентябрь 1934 г.

Непременный секретарь академик *В. Волгин*

Редактор издания академик Ф. Ю. Левинсон-Лессинг

Технический редактор Е. Г. Доскач
Ученый корректор М. И. Коровин

Сдано в набор 7 июля 1934 г. — Подписано к печати 9 сентября 1934 г.

58 стр.

Формат бум. 62×94 см. — $3\frac{5}{8}$ печ. л. — 41 664 тип. зн. в л. — Тираж 2175
Ленгорлит № 23707. — АНИ № 314. — Заказ № 52

Типография Академии Наук СССР. В. О., 9 линия, 12

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	5
I. Родоначальные магмы	11
Взаимоотношения кислой и основной магм	—
II. Дифференциация	28
Кристаллизационная дифференциация	30
Ликвация	33
Концентрационная дифференциация	36
Отжимание	37
Ассимиляция	39
Смешение магм	40
Выводы о дифференциации	41
Взаимоотношения габбро и гранитов	42
Мономинеральные породы	45
Заключение	47
Выводы	51
Литература	54

CONTENTS

	Page
Introduction	5
I. The mother-magmas	11
Relation between the acid and the basic magmas	—
II. Differentiation	28
Cristallisation-differentiation	30
Liquation	33
Concentration-differentiation	36
Filter-pressing	37
Assimilation	39
Mixing of magmas	40
Conclusions on differentiation	41
Relation between granites and gabbros	42
Monomineral rocks	45
Summary	47
Conclusions	51
References	54

ПРОБЛЕМА ГЕНЕЗИСА МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД И ПУТИ К ЕЕ РАЗРЕШЕНИЮ¹



ВВЕДЕНИЕ

Неохотно и не без некоторых колебаний взялся я за предложенную мне тему по двум причинам. Во-первых, потому что вопрос о происхождении изверженных пород является не только центральной проблемой всей петрографии, но вместе с тем и проблемой геологии, теснейшим образом связанной с такими крупными основными проблемами, как дислокации земной коры и вулканизм. Поэтому охватить полностью проблему генезиса изверженных пород в краткое время, которое предоставлено мне для доклада, конечно, нет никакой возможности. Во-вторых, трудно говорить на тему, когда взгляды по трактуемому вопросу еще окончательно не установились, да и не могут установиться, постоянно видоизменяются, текут. Поэтому я и даю в своем докладе не решение поставленного вопроса, а освещение его современного состояния, современных исканий в нем и намечаемых путей к его разрешению. К разрешению проблемы генезиса изверженных пород можно идти двумя путями: во-первых, дедукцией — от состава и строения земной коры и от данных геофизики и геохимии — это путь гипотез; во-вторых, индукцией — от конкретного изучения изверженных пород и их ассоциаций, геологического и географического их распространения, т. е. исходить из самых мест непосредственного их формирования из магмы — это путь фактов.

Первый путь дает слишком общее и к тому же не однозначное решение, так как данные геофизики и, в частности, сейсмологии отличаются некоторой разноречивостью. Соображения, основанные на сейсмологии и на общих геохимических построениях

¹ Доклад, читанный в Геологической ассоциации Акад. Наук 7 февраля 1934.

ниях (например, соображения Гольдшмидта и Таммана), может быть, кое-что и говорят о первоисточниках магмы, но не о конкретных магмах на местах их превращения в изверженные породы — а нас, конечно, интересует именно это.

Надежнее второй путь, и, во всяком случае, в нем заключается весь центр тяжести собственно петрогенетической проблемы, а не общей проблемы о строении и составе земной коры. Здесь мы исходим из фактов в области, доступной для непосредственного наблюдения. Вот эти факты: 1) существование лишь определенных типов изверженных пород как по минералогическому, так и по химическому составу, а не каких угодно ассоциаций; 2) повторение одних и тех же типов за все геологические времена; 3) неодинаковое распространение разных пород и значительное преобладание некоторых из них; 4) определенные ассоциации изверженных пород в виде петрографических формаций; 5) отличительные особенности разных областей распространения изверженных пород, так называемые петрографические провинции и другие факты, говорящие о неоднородности состава земной коры.¹

Основной вопрос нашей проблемы заключается в следующем: мы знаем, отчасти, магмы, знаем изверженные породы; как образуются последние из первых? Представление о том, что каждая порода образуется из особой магмы, давно оставлено, да и вряд ли существовало в виде научной гипотезы. Число магм значительно меньше, чем число магматических пород; следовательно существуют какие-то процессы, которые приводят к образованию из одной магмы нескольких магматических пород. Совокупность этих процессов и есть то, что мы называем дифференциацией. Второй основной вопрос такой: образуются ли изверженные породы всегда из той или иной родоначальной магмы, или же в тех или иных случаях, путем регенерации, переплавления более древних пород, ведущих свое начало от родоначальной магмы?

Ставя эту альтернативу, мы, следовательно, допускаем возможность двоякого происхождения изверженных пород, суще-

¹ Для иллюстрации этой неоднородности можно было бы привести много фактов; ограничимся хотя бы двумя примерами: месторождения олова связаны с гранитами, но далеко не все граниты, а лишь немногие из них содержат олово и сопровождаются месторождениями оловянного камня; платина связана с дунитами, но не все дуниты содержат платину.

ствование двух типов: протогенных, или прототектитов, и дейтерогенных, получающихся путем палингенеза или анатексиса,—это анатектиты. В конце мы увидим, что возможен еще и третий тип — то, что можно назвать синтектитами, т. е. продукты смешения разных магм. Палингенез, или анатексис,¹ т. е. возрождение или переплавление, может быть результатом или повышения температуры, или понижения давления, приводящих к расплавлению либо более древних пород, либо первоисточника изверженных пород, если этот последний является не жидкой, а твердой, потенциально жидкой магмой. Таким образом, мы приходим к вопросу о родоначальных магмах. Но прежде чем заняться ими, еще одно вводное замечание.

Если окинуть общим беглым взором всю геологическую историю земной коры и всю совокупность известных нам магматических пород, если принять во внимание, что качественно всегда повторялись одни и те же породы, быть может с незначительными, далеко не окончательно установленными исключениями—но количественные соотношения разных пород обнаруживают повидимому некоторые особенности докембрия и послекембрийских времен — то естественно подойти к проблеме генезиса изверженных пород и с точки зрения возраста. Все петрографы хорошо знают, что это представление о значении возраста нашло себе отражение в терминологии эффузивных пород — для пород древних были одни названия, для пород молодых другие. И можно сказать, что еще на заре микроскопической петрографии против такой двойственной терминологии и приписывания возрасту какого-то решающего значения раздавались многие голоса; одним из первых возражал против этого Ольпорт. Затем, как известно, Брёггер этому вопросу придавал совершенно иной поворот, когда предложил термины палеовулканический и неовулканический заменить терминами кайнотипный и палеотипный. У нас возражали против значения возраста А. П. Карпинский, Венюков (в работе о монгольских базальтах) и некоторые другие.

Это учение одно время имело серьезных сторонников во французской петрографической школе. Оно ведет свое начало от Эли-де-Бомона, затем было развито Мипель-Леви и сводится к тому, что земной шар постепенно стареет, что он по-

¹ Дэли (62) неправильно применяет мой термин „синтексис“ (сплавление) вместо „анатексис“ (простое переплавление, выборочное плавление).

степенно отдает свои летучие компоненты, и поэтому условия кристаллизации с течением времени должны изменяться. В свое время на это возражал уже Делесс.

Вообще говоря, эта точка зрения теперь мало кем разделяется, но в последнее время ее все-таки опять отстаивает известный американский петрограф Дэли (62). Дэли отмечает, что $\frac{9}{10}$ всех гранитов в докембрии, что к докембрию относятся анортозиты, что такого обилия пегматитов, как в докембрии, не было впоследствии, что гранодиориты по преимуществу послекембрийские, что нефелиновые сиениты по преимуществу кайнозойские. Надо сказать, что это утверждение требует значительных поправок. Я не имею времени, чтобы на этом остановиться, но должен сказать, что в такой категорической форме это учение может быть нами принято. Кое-что здесь справедливо, но в общем надо сказать, что в разные орогенические эпохи повторяются одни и те же циклы—это было отмечено еще известным тектонистом Марсель Бертраном (95).

Как уже сказано, различные изверженные породы играют количественно различную роль в составе земной коры. Наибольшим распространением пользуются граниты и основные эффузивы, т. е. базальты в широком смысле слова. Неудивительно, что в поисках родоначальных магм, прежде всего к ним и обратились взоры петрографов и геологов. Базальтовая или габброидная, или просто основная магма, с одной стороны, гранитовая или кислая магма, с другой,—около этих двух магм по преимуществу и вращаются все построения и все споры. В общем, это соответствует построению Зюсса, по которому в земной коре есть верхний, более легкий слой и более богатый щелочами—его Sal (или Sial, как теперь охотнее говорят), и под ним более тяжелый, более богатый магнием и железом слой—его Sima. Некоторые авторы, как увидим дальше, говорят еще о средней или сиенитовой магме, другие о магме перидотитовой.

Базальтовая магма повторялась во все геологические периоды, с нее обыкновенно начинались циклы извержений, она признается всеми, хотя мнения об ее физическом состоянии и расходятся. Базальтовая магма находится под всей земной поверхностью как в области материков, так и под океанами, чего нельзя сказать про гранитовую магму. Если она существует, то повидимому только под материками, о чем говорит

средний валовой химический состав материков и дна океанов и отсутствие кислых пород в океанических областях.¹ Одинаковое распространение гранитов и базальтов, о котором мы обыкновенно говорим, относится только к материковым участкам.

Существует ли базальтовая магма всегда в готовом виде, или же она возникает периодически? На точке зрения периодического ее возникновения стоит, как известно, Джоли с его теорией периодического возникновения базальтовой магмы от накопления тепла вследствие радиоактивного распада. Сторонники значительной внутренней теплоты земного шара считаются с существованием постоянной базальтовой магмы, либо действительно жидкой, либо потенциально жидкой, т. е. достаточно нагретой, чтобы перейти в жидкое состояние при уменьшении давления. Многие молчаливо признают жидкую базальтовую магму. Сторонник этого взгляда Дэли в последнее время изменил свою точку зрения и считает, что базальтовая магма находится в стекловатом состоянии. Упругие свойства такого стекловатого базальтового слоя хорошо согласуются с тем, что требуется сейсмологией на основании скорости распространения сейсмических волн в тех слоях земной коры, где предполагается существование базальтовой магмы. К этой точке зрения примыкает и Боуэн, так как он считает, что если базальтовая магма существует не в жидком, а в твердом состоянии, то именно в стекловатой форме. По его мнению, расплавление этой стекловатой потенциальной магмы даст действительно базальтовый расплав, между тем как если бы базальтовый слой был действительно твердым кристаллическим базальтом, его плавление повело бы к выплавлению из него более кислой магмы, так как стекловатый базальт сразу переходит в жидкую фазу, а в твердом базальте будет наблюдаться постепенное плавление и, следовательно, кристаллизационная дифференциация. Это утверждение мне кажется неверным. Достаточно для иллюстрации вспомнить хотя бы недавно произведенные А. И. Цветковым опыты плавления сибирских траппов, для того, чтобы убедиться в том, что плавление действительно идет постепенно; но если не произойдет закалки, отсадки или вмешательства каких-либо посторонних сил, то расплавится все, и мы из твердого базальта получим настоящий базальтовый расплав.

¹ См. Левинсон-Лессинг (34).

Другой взгляд на потенциальную базальтовую магму — это точка зрения, которую развивал Фермор, а впоследствии Эскола, а именно: что на большой глубине, где все минеральные образования находятся под большим давлением и минеральные ассоциации должны подчиняться так называемому закону объемов, базальтовая потенциальная магма должна находиться в виде наиболее плотной минералогической ассоциации, какую может дать основная магма, т. е. в виде эклогита. За эклогит стоит и Хольмс, считающий, что эклогит является эвтектикой, а потому и плавится сразу целиком.

Нельзя не упомянуть, что Боуэн считает, что сама базальтовая магма произошла путем выборочного плавления более основной перидотитовой магмы, о которой речь будет дальше.

Стекловатый базальт, конечно, является некоторым допущением, некоторой фикцией. Дэли сам признает трудность доказательства того, что базальтовая магма находится не в жидком, а в стекловатом состоянии, но принимает ее ввиду неспособности других теорий удовлетворительно объяснить факты, которые устанавливает сейсмология.

Может быть позволительно высказать некоторые сомнения: нам еще недостаточно известны упругие свойства жидкостей под большим давлением и при высоких температурах для того, чтобы иметь основание утверждать, что упругие свойства, которые соответствуют скорости распространения сейсмических волн, лучше согласуются с представлением о стекле, чем с представлением о жидкой магме. Поэтому естественней и проще признать базальтовую магму за магму в настоящем смысле слова, за расплав.

Как бы то ни было, существование базальтового слоя в том или другом виде признается всеми.

Не так обстоит дело с гранитовой магмой: она спорна. Дэли признает, что она когда-то существовала, но уже вся, так сказать, израсходована, дала верхнюю твердую гранитовую оболочку земной коры. Отрицает ее и Боуэн, а вместе с ним и все сторонники его петрогенетических построений. И насколько нет разногласий по вопросу о генезисе базальтов и близких им основных пород, настолько же разнообразны и спорны взгляды на генезис гранитов, как увидим несколько дальше. Однако значительные излияния кислых лав говорят, мне кажется, о реальном существовании кислых магм.

Широко распространенное представление о строении земного шара таково: до глубины в 1200 км Sial и Sima, или по последней схеме Дэли — гранитная оболочка, пьезогаббро, стекловатый базальт и внизу стекловатый перидотит, затем до глубины в 2900 м окисная зона и зона сульфидов, а затем железистое ядро (Nife по Зюссу). Но это мало дает нам непосредственно для петрогенезиса. Нас в первую голову интересуют первые десятки километров, скажем до 100—120, и во многих случаях даже лишь самые верхние десятки километров, или даже первый десяток километров, ибо там совершаются процессы интрузии.

Перейдем теперь от отвлеченных рассуждений о строении земной коры к конкретному петрологическому изучению магм и процессов превращения магм в магматические породы.

Для полного освещения процесса превращения магмы в магматические породы и причин их разнообразия следовало бы рассмотреть условия охлаждения и кристаллизации магмы, а следовательно и самую природу магмы, механизм интрузий и вулканических извержений и всю совокупность явлений дифференциации. Конечно времени у меня для этого не хватит, и поневоле я принужден заострить свое внимание на некоторых из этих вопросов, оставив остальные в стороне.

Прежде всего, обратимся к центральной части проблемы генезиса изверженных пород, к контроверзе о монофилетическом или полифилетическом их происхождении, т. е. к вопросу о том, достаточно ли одной базальтовой родоначальной магмы для всех изверженных пород, или нет.

I. РОДОНАЧАЛЬНЫЕ МАГМЫ

Взаимоотношения кислой и основной магм

Вопрос о родоначальных магмах в последнее время переживает своего рода кризис. Ревизия установившихся было взглядов вносит в них при свете новых успехов экспериментальной петрографии и новых геологических наблюдений те или иные поправки и видоизменения. При этом, как это часто наблюдается в ходе развития теоретических воззрений на явления природы, возрождаются в обновленном виде старые взгляды или совершается эклектический синтез различных воззрений.

Этот вопрос был мною поставлен и разрешен в пользу бифе-

летичности изверженных пород, т. е. в пользу старой гипотезы Бунзена, Рейера (53)¹ и др. о двух магмах, кислой и основной, еще в 1910 г. (71). Ему был затем посвящен доклад в 1929 г. на Минералогическом съезде в Ленинграде (48) и он нашел себе отражение в моей Петрографии (49).

Не повторяя всего, что было высказано мною в этих работах и в других местах, посмотрим, как решается этот вопрос в настоящее время другими авторами и есть ли достаточное основание отказаться от наших воззрений, или внести в них те или иные существенные изменения.

Одно время казалось, что восторжествовала теория единой базальтовой магмы Дэли (6).² Значительная экстраполяция экспериментальных данных дала возможность Боуэну (88) построить стройную картину эволюции всех изверженных пород, которая затем была значительно расширена и дополнительно обоснована (70). Боуэновская концепция нашла широкий отклик у петрографов. Многие встали на его точку зрения и считали взгляд о самостоятельном существовании кислой магмы наряду с основной устаревшим, и, так сказать, отпавшим. Правда, этой теории единой родоначальной магмы и происхождения из нее всех изверженных пород путем кристаллизационной дифференциации противоречили многие геологические данные. Правда, она опиралась на опыты с простыми и притом сухими силикатными системами, результаты которых считалось возможным экстраполировать на сложные природные магмы. Правда, при этом требовалась помощь подсобных гипотез (отсадка, отжимание, закалка), и иногда делались допущения, которые противоречили фактам (как, например, отсутствие контактных действий у анортозитов, отсутствие жильной формы залегания у мономинеральных пород). Но простота единого эволюционного ряда и, как казалось без достаточной критики, прочный экспериментальный фундамент подкупали в пользу схемы Боуэна. Конечно, раздавались голоса критики, голоса в пользу самостоя-

¹ Характерно, что доказательство самостоятельности двух магм Рейер видит в значительном распространении кислых и основных пород и сравнительно незначительном распространении переходных типов, значительно опередив в этом отношении всех нас.

² Задолго до Дэли гипотезу единой базальтовой магмы и ассимиляции ею вышележащих кислых магматических и осадочных пород высказали Котта (8) и Грин (11).

тельности кислой магмы. Но эти голоса, к числу которых принадлежал и я, все-таки были, казалось, в меньшинстве и одно время рисковали, возможно, даже быть сочтенными за устаревшие, отсталые. Однако в самые последние годы с разных сторон, и притом со стороны авторитетных петрографов, открыто и определенно стали громко раздаваться голоса о недостаточности теории единой базальтовой магмы и против эволюции из нее всех изверженных пород путем кристаллизационной дифференциации [Феннер, 1931 г. (1), Хольмс, 1931 г. (2), Крокстрём, 1932 г. (3)], и было предложено несколько новых гипотез. Почти одновременное появление гипотез Хольмса, Эсколы, Феннера говорит о том, что в течение некоторого времени, как бы в скрытом виде, шла работа накопления данных против схемы Боуэна, и затем это в должный момент прорвалось наружу. Мы имеем здесь аналогию с учением Зюсса, отрицавшим вертикальные поднятия. Возражать против этого учения одно время считалось как бы ересью, и единичные голоса в пользу реальности вертикальных поднятий были исключениями; а затем настал момент, когда наступила реакция, и в настоящее время не только не отрицают вертикальных поднятий, но быть может даже придают им слишком большое значение. К этим двум случаям вполне применимо с некоторой оговоркой изречение Сент-Бёва: „Il ne suffit pas d'être grand homme, il faut venir à temps“ — не только люди, но и теории могут рассчитывать на успех, если приходят тогда, когда для них подготовлена почва.

Все эти протестующие и новые взгляды говорят одно: единой базальтовой магмы недостаточно, граниты и некоторые другие породы не ведут своего начала от базальтовой магмы; но вместе с тем разные авторы отвечают различно на вопрос о том, откуда ведут свое начало граниты и какие нужно внести добавления в гипотезу единой магмы.

Рассмотрим эти новые взгляды, каждый в отдельности.

Остановимся прежде всего на новом взгляде Хольмса (20),¹ который не только допускает необходимость самостоятельной гранитовой магмы, наряду с базальтовой, но считает эти две магмы недостаточными и высказывается в пользу самостоятельного существования еще отдельной третьей магмы, перидотитовой, от которой ведут свое начало ультраосновные породы.

¹ Впервые идея о трех магмах была высказана Хольмсом еще в 1915 г. (47).

Каковы данные для признания самостоятельной перидотитовой магмы и можно ли допустить существование таковой? Мне кажется, что на второй вопрос надо дать отрицательный ответ. Решающим моментом в таких вопросах должны быть не соображения, подчас арифметического характера, о возможности вывода тех или иных пород из той или иной магмы путем вычета тех или иных минералов и арифметического комбинирования возможных ассоциаций минералов, а геологические соотношения разных пород той или иной петрографической формации. Формы залегания, распространение, возрастные взаимоотношения, контактные действия, существование переходных звеньев в поле — вот что должно быть решающим критерием. Насколько я сейчас могу припомнить, перидотиты не находят здесь подкрепления взгляда на них, как на продукты кристаллизации самостоятельной магмы. Перидотиты отнюдь не пользуются тем широким распространением, какое мы привыкли связывать с породами самостоятельной магмы (граниты, базальты). Сравнительно редко встречаются они в виде самостоятельных образований, как, например, кимберлиты, обыкновенно же они входят в состав габбровой формации, как один из ее членов. Между перидотитами и габбро существуют в некоторых случаях переходные звенья, через меланократовые габбро и полевошпатовые перидотиты. Я не помню примеров контактного воздействия между габбро, пироксенитами, перидотитами или дунитами там, где они входят в состав одной формации и соприкасаются между собою. Они не секут друг друга жилами (кроме отдельных незначительных случаев), а, напротив того, часто связаны постепенными переходами. Одним словом, получается определенное впечатление, что это разные члены единой дифференциационной серии, а не породы, получившиеся из самостоятельных источников. А случаи самостоятельных перидотитовых массивов также мало могут быть рассматриваемы как доказательство их самостоятельного происхождения из особой магмы, как и массивы сиенитов и некоторых других пород. Наконец, если бы существовала перидотитовая магма, то следовало бы ожидать гораздо более частого нахождения ее эффузивной фации, которая, однако, является редкостью.

Перидотитовая гипотетическая магма Холмса, к которой относятся все вышеприведенные соображения, отличается еще одной особенностью, которая делает признание ее за одну из

родоначальных магм еще более сомнительным. Магма Хольмса сравнительно богата щелочами, что является для перидотитов исключением, а не общим правилом. Если признать самостоятельное существование перидотитовой магмы, то с таким же правом можно было бы признать и пироксенитовую магму (пироксениты иногда образуют самостоятельные массивы) и тем более магму дунитовую (известны мощные самостоятельные массивы). Как известно, Добрэ в свое время признавал существование оливиновой магмы, которая, по его мнению, всюду подстилает породы земной коры, представляет то, что он называл „*scorie universelle*“. И скорее есть основание для признания дунитовой магмы, которая нередко образует мощные самостоятельные массивы. Мне также непонятно, каким путем произошли из перидотитовой магмы дуниты и пироксениты.

Значительную роль в строении земной коры приписывает Вашингтон (57)¹ перидотитовой магме (с 48.95% кремнекислоты). Оливиновую магму принимает и Алешков (58), примыкающий в этом отношении к Добрэ, но считающий ее за единственную магму.

Если мы не пойдем по пути признания перидотитов за самостоятельную родоначальную магму, а будем считать их генетически связанными с габбро, то перед нами встанет необходимость выяснения возможности произвести перидотиты путем дифференциации из магмы габбро. Здесь мы встречаемся с некоторыми затруднениями, возможность устранения которых мною еще не вполне выяснена. Одно из существенных затруднений заключается в том, что в габброперидотитовой формации уральского типа отсутствуют или играют очень подчиненную роль анортозиты. А между тем, как-будто следует ожидать, что обособление перидотитов из габбровой магмы путем дифференциации должно быть компенсировано образованием анортозитов — ибо в противном случае непонятно, куда деваются щелочи. Но габбровая магма, дающая начало габброперидотитовой формации, насколько можно судить по Уралу, отличается от обычной базальтовой магмы большей основностью, избытком магнезии и закиси железа и низким содержанием щелочей. И потому вполне возможно, что комби-

¹ Вашингтон дает предположительную мощность для гранитовой оболочки 20 км, для базальтовой 40 км, а для перидотитовой 1504 км.

нация ультращелочноземельных габбро, перидотитов и пироксенитов с небольшими массами анортозита в дифференцированных полосатых габбро, иногда и самостоятельно, затем лейкократовых габбро, фореллейнштейнов и примесей полевых шпатов в некоторых перидотитах и пироксенитах в совокупности соответствует исходной габбровой магме. Быть может объяснением отсутствия анортозитов в некоторых габбровых формациях являются натровые альбитизированные контакты габбровых пород, т. е. можно считать, что натр в одних случаях ушел в адинолы и спилзиты, в других в анортозиты.

В подкрепление правильности представления о перидотитовой родоначальной магме Хольмс ссылается на кимберлит, на трансвальские дуниты (которые Вагнер однако производит от базальтовой магмы), наконец, на змеевиковый пояс Ю. Австралии, описанный Бенсоном (4), на змеевики альпийско-гималайско-малайские. Можно было бы к этому прибавить уральский змеевиковый пояс, северо-кавказский и закавказский. Но являются ли эти факты доказательством для гипотезы абиссальной (deep seated) перидотитовой магмы, лежащей под базальтовой магмой? Мне кажется, что нет. Независимо от того, считать ли змеевики за первичные протопневматолитические изверженные породы, или за перидотиты и пироксениты, вторично измененные пневматолитически или гидротермально, они доказывают лишь одно, а именно, что они явились на место своего залегания в виде магмы, что они находились в жидком состоянии, а не представляют аккумуляции кристаллов по Боуэнской схеме кристаллизационной дифференциации. Но отсюда до вывода о самостоятельной родоначальной магме еще далеко. В противном случае мы должны были бы считать и сиениты, и диориты, и нефелиновые сиениты за продукты отдельных самостоятельных магм. Я полагаю, что между утверждением, что данная порода пришла в то место, где она застыла в виде жидкости, и предположением о том, что это самостоятельная родоначальная магма, различие существенное. В первом случае происхождение данного расплава может быть различно, вопрос о нем не решается только на основании того факта, что порода на месте своего залегания образовалась из расплава; этот последний может и не быть самостоятельной родоначальной магмой, а лишь дифференциационным отпрыском от базальтовой магмы.

Перидотитовую магму допускает и Боуэн (70, стр. 315), считающий ее даже той родоначальной магмой, из которой путем выборочного выплавления (selective fusion) получается материнская магма всех изверженных пород — магма базальтовая.

Защищая необходимость признания двух родоначальных магм и приводя в своей „Петрографии“ группировку всех изверженных пород в два самостоятельных ряда — кислая магма и ее производные, основная магма и ее производные, — я всегда исходил из некоторых положений, вытекающих из наблюдений. Эти положения сводятся к следующему:

1) непосредственных переходов между основными и кислыми породами ни в интрузивных образованиях, ни в лавовых сериях нет;

2) там, где такие переходные звенья как-будто и имеются, они обыкновенно оказываются ублюдковыми породами;

3) при совместном нахождении в сложных комплексных интрузивах гранитов и габбро, детальное геологическое их изучение всегда обнаруживает одновременное их появление в данном массиве.

Нисколько не сомневаясь в правильности этих положений, нельзя однако не обратить внимания на одно обстоятельство, которому мною до сих пор не было уделено должного внимания, а именно, некоторой двойственной роли типичных средних пород, сиенитов и трахитов. Что сиениты и трахиты во многих случаях и геологически и химико-минералогически связаны с кислыми породами — это не подлежит сомнению. Однако также несомненно, что в некоторых случаях сиениты теснейшим образом связаны геологическими переходами с габбро (габбро-сиениты, монцониты) и входят в состав той формации габбро, которую я называю южно-русской (украинской) или норвежской. Точно так же в последнее время установлена тесная связь трахитов с тихо-океанскими базальтами. Таким образом, для сиенитов и трахитов устанавливается двойная генеалогическая связь; но они вместе с тем, стигмю не являются генетическим связующим звеном между породами кислой и основной магм. Насколько мне известно, достоверных примеров формаций с бесспорными связующими звеньями от габбро к сиенитам и от этих последних к гранитам (или от базальтов через трахиты к липаритам) не существует. Сов-

местное нахождение кислых и основных пород само по себе еще не говорит об общности происхождения из единой родоначальной магмы (основной). Приведу, например, недавнее свидетельство знатока финляндских гранитов Зедергольма (50, стр. 16—17). По его словам, до сих пор не найдено достоверных („sichere“) переходов между рапакиви и основными породами, встречающимися совместно с ними; наоборот, нередко встречаются гибридные породы, часто брекчиевидные, представляющие смесь гранита и выплавленных основных включений. По поводу генетической связи рапакиви и оссипита, часто встречающихся совместно, он говорит, что нельзя отрицать того, что магма рапакиви претерпела дифференциацию, но эта дифференциация никогда не вела к оссипитам. Он допускает, как и я сам, существование гранитных прожилков („veins“), как последнего кристаллизационного остатка при дифференциации базальтовой магмы; но размеры их незначительны. Зато чаще, по его словам, — это очень важно — встречаются основные породы, образовавшиеся из гранитов или граодиоритов (19). [Corin также констатирует, что граниты везде, где мы их встречаем, внедрились в другие породы, как чуждые образования, следовательно, граниты образуются на недоступной для нас глубине].

Как же объясняется это двойственное положение средних пород?

Можно было бы предположить, что средняя магма сиенитового типа является той единой родоначальной магмой, от которой ведут свое начало два магматических ряда: кислый и основной (Вашингтон). Химически такое положение находит себе подтверждение в том, что средний валовой состав всех изверженных пород, как известно, соответствует именно сиениту. Но геологически эта концепция не может быть обоснована, несмотря на то, что в отдельных случаях, как это было в свое время установлено Иддингсом, извержения начинаются со средних пород и затем сменяются двумя одновременными ветвями: кислой и основной. Ни сиениты, ни трахиты не пользуются таким широким распространением и не дают таких мощных массивов или массовых излияний, как породы кислой магмы, или магмы основной.

Остается другое предположение: сиениты и трахиты представляют пример пород, которые могут возникать различным путем: либо путем дифференциации кислой магмы, либо путем

дифференциации магмы основной. Это случай конвергенции, которой мы можем назвать гетерогенной.

Насколько я припоминаю, Брёггер был первым, отметившим возможность образования одной и той же породы различными путями и предложивший это различие генезиса обозначать соответствующим прилагательным. Брёггеровское указание на то, что мы называем здесь гетерогенией, относится, однако, к некоторым, сравнительно не широко распространенным типам; мы же здесь применяем его к столь широко распространенным породам, как сиениты и трахиты.

Спрашивается, существуют ли какие-нибудь различия в минералогическом и химическом составе сиенитов гранитовой ветви и габбровой ветви? Данные в этом направлении еще не собраны и не систематизированы, если не считать более значительной роли плагиоклазов в сиенитах габбровой ветви, ведущей к габросиенитовому (монцонитовому) типу, сопутствующему сиенитам этого ряда. В геологической ассоциации пород габросиенитовой формации существуют определенные особенности, отличающие их от формации сиенитогранитовой. Две из этих особенностей резко бросаются в глаза: это, с одной стороны, габросиенитовый (монцонитовый) ряд, связывающий переходными звеньями сиениты с габбро и доказывающий общность их происхождения; с другой стороны, значительная роль анортозитов (лабрадоритов) в этой формации. Ассоциация лабрадоритов с сиенитами в южно-русском и норвежском типе габбровой формации имеет, мне кажется, и генетическое значение: она может быть рассматриваема как один из существенных доводов в пользу происхождения этих сиенитов от габбровой магмы. В самом деле, если путем дифференциации из габбровой магмы получается лабрадорит, то одновременно должна получаться и другая порода, обогащенная щелочами, в особенности калием и кремнекислотой. Такой породой и является сиенит. И мною, в 1921 г. (37) и позднее Феннером было показано, что конечным продуктом дифференциации габбровой магмы может быть именно сиенит, а не гранит. По Феннеру (36), остаточная эвтектика, обогащенная альбитом, составляет только 12% первоначальной магмы (у меня тоже получалось около 10%),¹ и она будет иметь такой состав: 56% Ab,

¹ По Хольмсу (74, стр. 254), в работе об ассоциации кислых и основных пород, из базальтовой магмы получается только 10% гранофира.

14% An и 30% Di, что близко к моему (37) подсчету: 50% Ab, 26% An и 24% Di.

Перейдем теперь к другим работам последнего времени по интересующему нас вопросу и остановимся, главным образом, на вопросе о происхождении гранитов.

Центральным местом в проблеме генезиса изверженных пород является вопрос о происхождении гранитов. Нет надобности углубляться в дебри истории этого вопроса; достаточно разобрать несколько новых работ о генезисе гранитов, чтобы убедиться в том, что образование гранитов путем непосредственной кристаллизации кислой магмы, казалось бы, считавшееся установленным, не является общепринятым. Этой теории протогенного происхождения гранитов, т. е. образования их путем непосредственной кристаллизации кислой магмы, противопоставляется в разных формах гипотеза палингенного происхождения. Под названием палингенного происхождения, т. е. палингенеза Зедергольма, мы понимаем здесь все попытки объяснения вторичного генезиса гранитов, путем ли непосредственного переплавления более древних гранитов, или путем выборочного плавления или переплавления древних осадков и т. п.

Работы последних лет по вопросу о происхождении гранитов отличаются разнообразием взглядов, но объединяются в одном отношении: они являются отражением того кризиса, который переживает теория происхождения гранитов из базальтовой магмы путем кристаллизационной дифференциации. При всем разнообразии новых гипотез общим для них является убеждение, что граниты не могут быть получены путем кристаллизационной дифференциации базальтовой магмы, что надо искать других объяснений для генезиса гранитов.

Остановимся на этих работах и посмотрим, в какой мере высказываемые в них взгляды являются приемлемыми и предпочтительными пред простым признанием гранитов за продукты непосредственной кристаллизации особой кислой магмы.

Одна из гипотез, которая применяется в различных формах к толкованию генезиса гранитов, — это гипотеза переплавления (анатексиса или палингенеза, по Зедергольму) древней гранитовой коры.¹ До известной степени этот взгляд был уже выска-

¹ Многие примеры для иллюстрации гипотезы переплавления приведены у Дэли (2, стр. 289).

зан Зедергольмом, а до него переплавление в широких размерах было указано Лоусоном (61) для района Rainy Lake. Наиболее полное выражение гипотеза анатексиса нашла себе в представлениях Дэли.

Но Дэли ведь признает все-таки, что кислая часть земной коры, теперь находящаяся в твердом состоянии и путем переплавления дававшая начало постархейским гранитам, когда-то находилась в жидком состоянии. Следовательно, Дэли признает все-таки первично-магматическое происхождение гранитовой оболочки. Образование вторичных гранитов путем ассимиляции, которое было указано Дэли, относится лишь к некоторым частным случаям, а не к гранитам вообще.

К анатектическим представлениям о происхождении гранитов примыкает и Бубнов (12).

Своеобразную формулу придал принципу переплавления Эскола (19), исходя из того положения, что гранитная эвтектика является наиболее легкоплавкой силикатной системой, и призывая на помощь отжимание силикатной жидкости от твердых минеральных масс (squeezing out, filter-pressing). Опираясь на эти два фактора, Эскола выводит граниты двояким путем. С одной стороны, граниты являются выжимками легкоплавкой гранитной эвтектики, получающейся путем дифференциации базальтовой магмы. Эскола не только признает схему кристаллизационной дифференциации Боуэна, но старается даже устранить некоторые возражения на нее, как, например, подчеркиваемый Феннером (1) факт, роковой для этой схемы, что остаточная жидкость при кристаллизации базальта обогащена железом. Однако это обстоятельство, мне кажется, является веским аргументом против схемы Боуэна, не говоря уже о том, что остаточная жидкость кристаллизующейся базальтовой магмы отнюдь не идет дальше сиенита, разве лишь с второстепенным содержанием кварца (см. мои вычисления и вычисления Феннера). Соображения Эсколы об относительном богатстве гранитов железом (стр. 465—466), по моему, шатки. Мне непонятно и возражение Боуэна, который говорит, что только в быстро застывающей базальтовой магме остаток обогащен закисью железа, а в медленно застывающей глубинной магме, благодаря реакционным явлениям, получается обогащение SiO_2 . Мне кажется, что надо ожидать как раз обратного, и что в глубинной магме, если отсадка и отжимание не выводят оливина из поля реакции, ни-

какого обогащения кремнекислотой быть не может. По Феннеру (36, стр. 544) направление кристаллизационной дифференциации в базальтах и в глубинных породах различно; условия лабораторных опытов подходят именно к условиям кристаллизации эффузивной магмы, а здесь то как раз и наблюдается расхождение.

Обогащение остаточной магмы железом, установленное Феннером, имеет, однако, место, по его словам, лишь в том случае, если действует исключительно кристаллизационная дифференциация. Остаточная часть базальтовой магмы, как указывает Феннер (21) в работе о кристаллизации базальта, дает пироксен, полевой шпат и магнетит, что отнюдь не соответствует граниту. В базальте плагиоклаз кристаллизуется раньше авгита, а магнетит часто последним; стекло богато авгитом и магнетитом.

Нельзя также не привнать во внимание, что количество микропегматита, которое получается в процессе кристаллизации основной магмы (и действительно имеется в некоторых долеритах и габбродиобазах) незначительно, и вряд ли его можно делать ответственным за мощные гранитовые массивы.

Наконец, в некоторых, а может быть и во многих случаях, этот микропегматит получается в результате ассимиляции богатых кремнекислотой пород, как я, например, считаю это доказанным для габбродиобаза из Щелик (на западном берегу Онежского озера), анализированного Валем.

Граниты, образовавшиеся этим путем, являются по Эскола гранитами дифференцированными. Но образование гранитов путем переплавления возможно еще и иным путем, а именно, выплавлением гранитной эвтектики из любых слоев земной коры при повышении температуры. Так как гранитная эвтектика наиболее легкоплавкая силикатная система, то из любой породы, содержащей кремнезем, глинозем и щелочи, при достаточном повышении температуры будет выплавляться именно она. А будучи отката, эта переплавленная силикатная масса и даст гранит палингенный, но образовавшийся путем выборочного плавления разнообразных горных пород. Эскола склонен даже считать, что своеобразный состав многих метаморфических пород объясняется именно тем, что из них выплавлены составные части гранита. Граниты палингенные

отличаются будто бы от дифференциационных отсутствием рудных контактов. Этому процессу выплавки Эскола приписывает существенную роль в образовании гранитов и относит к типу палингенных гранитов, например, гранит Ганге и прибегает даже к такой метафоре, как сравнение гранитной магмы с потом, который выделяет мать-земля от усилий при горообразовании.

Легкоплавкость гранитной эвтектики иллюстрируется и тем фактом, что контактное действие некоторых габбровых пород на граниты выражается именно в том, что гранит, по выражению Белянкина, оживает, из него выплавляется эвтектика. Это, конечно, доказывает легкоплавкость гранитной эвтектики. Но ведь это явление приурочено к узкой контактной зоне и, конечно, не может быть признано объяснением происхождения больших гранитных масс. К тому же ведь мы имеем здесь переплавление гранита, — а как же образовался этот гранит? Проблема гранита все-таки остается в этом случае неразрешенной.

Замечу мимоходом, что контактметаморфическое переплавление гранита габбровыми интрузиями было установлено Белянкиным (38) и еще раньше Полкановым (39), а Эскола говорит только о гораздо более поздней работе Лайтакари (40), не упоминая Белянкина и Полканова.¹

Таким образом гранитовая эвтектика действительно может быть выплавлена из гранитов же (следовательно вопрос об исходных гранитах остается открытым) и дать незначительные прожилки или нашлапки на габброноритовых массивах. Но от выплавления гранитовой эвтектики до образования мощных гранитовых массивов еще далеко. Эти выплавленные жидкости должны быть отжаты и объединены в большие магматические бассейны и должны пройти через сложные магмо-тектонические

¹ Это является еще одним примером того неблагоприятного для нас обстоятельства, что русские работы часто остаются за границей неизвестными или замалчиваются. Отчасти мы сами в этом виноваты, так как не заботимся о реферировании русских работ в иностранных реферирующих журналах. Необходимо проявить в этом отношении большую инициативу и энергию.

Случай расплавления рапакиви диабазом и внедрение расплавленного гранита в этот последний описан Зедергольмом (Geol. öfvers.-Karta öfver Finland. Sektionen, Bd. 2, p. 120).

процессы, чтобы превратиться в гранитовые интрузии. Рассмотрение всех этих процессов заняло бы у нас слишком много времени. Понятно, однако, что здесь много трудностей, в толковании пегматитов и контактов гранитов, при последовательном проведении точки зрения Эсколы.

Значительно раньше Эсколы такой же взгляд на выплавление гранитной эктектики из любой породы, погружающейся в глубокие слои земной коры, если только в ней имеются щелочи, глинозем и кремнезем, высказал Хольмквист (60). Но он применял, правда, это представление, которое он называет ультраметаморфизмом, к образованию интэкционных гнейсов (Adergneisse), а не гранитов.

Представление о том, что изверженные породы являются переплавленными осадочными образованиями, т. е. образовались на месте своего залегания „гидротермальным плавлением“, имело сторонников в прошлом столетии, отчасти и в начале текущего столетия; иногда оно всплывает и теперь. Граут (14) подверг эти взгляды критическому рассмотрению по отношению к Миннезоте с привлечением химических анализов и пришел к отрицательному выводу.¹

Эскола (73) согласен с Граутом в том, что граниты не могут быть получены непосредственным переплавлением осадочных пород на месте, но противопоставляет этому свое выборочное плавление осадочных пород и образование гранитов этим путем.

На точке зрения анатексиса стоит и Вольф, прибегающий для объяснения гранитов к переплавлению кислой оболочки Sial. В этой гипотезе существенно признание самостоятельного существования Sial и Sima, а следовательно и самостоятельных источников для гранитов и для основных пород. Я не имел в руках работы Вольфа (22) и потому не могу судить о ней с достаточной полнотой; она, повидимому, примыкает к взглядам Дэли, но оригинально решает проблему термальную, т. е. вопрос об источниках тепла, необходимого для переплавления Sial. Но во всяком случае Вольф признает существование гранитовой магмы, жидкой или потенциально жидкой, над базальтовой магмой, тоже жидкой или потенциально жидкой.

К точке зрения переплавления примыкает до известной степени и своеобразный взгляд Люжона (23). По его мнению,

¹ Там рассмотрена частично и современная литература.

граниты образуются не из магмы, а из глинистых осадков при раздавливании геосинклиналей, превращающихся в горные системы; при этом развивается достаточное количество тепла для расплавления горных пород. Мы не можем встать на точку зрения Люжона по многим причинам. Во-первых, сами глинистые породы образовались из гранитов, следовательно должны были существовать граниты более древние, чем древнейшие глинистые породы; мы попадаем следовательно в заколдованный круг, в который попал по моему и Хоббс (77), который в докладе на Канадском конгрессе в 1913 г. высказал гипотезу, что все изверженные породы представляют продукты переплавления глинистых пород. Во-вторых, граниты отнюдь не так однообразны, и их разнообразие превосходит разнообразие тех глинистых образований, из которых будто бы получаются граниты. В-третьих допущение, что при дислокационных процессах развивается достаточное количество тепла для расплавления горных пород не только гипотетично, но и неправдоподобно. Это предположение высказывалось ортодоксальными сторонниками динамометаморфизма. Но в плоскостях шарриажей, в крыльях и в ядрах многих складок, в метаморфических зонах, где действует дислокационное давление, мы имеем катакластические явления, милониты, тектонитовые структуры, но нигде не видим признаков хотя бы частичного плавления. В-четвертых гипотеза Люжона неприменима к гранитам с пегматитовой свитой, с контактными полями, рудными и иными. Люжон в общем примыкает к взглядам Ога, который представлял себе образование гранитов как процесс метаморфизации осадков в геосинклиналях на больших глубинах. Этот взгляд быть может и применим к некоторым гранитогнейсам, как это делает и Термье, но отнюдь не к настоящим гранитам с контактными полями, с пегматитами и аплитами.

К переплавлению твердой гранитной оболочки прибегает и Хольмс (2) для объяснения ассоциации основных и кислых пород в центральных комплексах; он рисует базальтовую интрузию в виде купола, в котором образуются конвекционные токи, расплавляющие вышележащую Sial. В этом Хольмс ищет выхода из затруднения, которое возникает благодаря тому, что он убедился в несостоятельности кристаллизационной дифференциации, а вместе с тем не желает допустить существование жидкой

кислой магмы.¹ Гранитовые породы получаются только (стр. 243) „where preexisting rocks of the Sial suite are present“.

За самостоятельность кислой магмы высказывались и многие другие (Клосс, Эрмандерфер, Феннер и др.).

До сих пор мы говорили об анатексисе в применении к генезису гранитов. Но представление о происхождении магмы путем анатексиса, т. е. переплавления, применялось и к базальтовой магме. Вспомним Фермора (51, 52), который производит базальтовую магму из гипотетической инфраплутонической эклогитовой зоны. Вспомним и последние взгляды Дэли, считающего, что базальтовая магма существует не в огненножидком, а в твердом стекловатом состоянии. Отсюда уже один шаг до старых представлений Рейера (53) о твердом потенциально-жидком состоянии магмы вообще. Правда, во всех этих взглядах речь идет о физическом состоянии глубоких слоев земной коры и о расплавлении некоторых участков земной коры целиком, а не о выборочном плавлении; но ведь все же речь идет об анатексисе и о происхождении магмы интрузивной и эффузивной путем переплавления.

В кратком разуме еще не опубликованного доклада Зедергольма (96) на конгрессе в Вашингтоне он возражает против возможности образования гранитов из основной магмы и считает более вероятной родоначальной магмой магму среднего состава („a magma of intermediate composition“). Высказываясь за происхождение многих гранитов путем палингенезиса, он вместе с тем говорит о том, что гранитовая оболочка существовала с древнейших времен; таким образом здесь тоже получается заколдованный круг.

Для суждения о генетических взаимоотношениях гранитов имеет значение сравнительная плавкость гранитов и основных пород. Выше уже было указано, что гранитная эвтектика является наиболее легкоплавкой силикатной системой. Очень долго считалось однако, что гранит плавится труднее базальта, пока опытами Шеперда, Мервина и Грейга (31) не было установлено противное для соответствующих сухих горных пород в лабораторной обстановке. Тем более, конечно, должна быть сравнительно легкоплавка и жидкоплавка природная глубинная гра-

¹ Интересно, что Thomas для Шотландии (Ardnamurchan), Guppy и Hawkes для Исландии говорят о необходимости самостоятельного существования кислой и основной магм.

нитовая магма, которую мы имеем основание считать более или менее богатой летучими компонентами и в частности составными частями воды. Фогт в одной из последних своих работ (21) определенно и, мне кажется, с полным основанием говорит о существовании в гранитовой магме под большим давлением в последней стадии ее застывания соединения $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (стр. 208). Способность гранитного расплава поглощать воду была непосредственно экспериментально установлена Горансоком; плавление гранита с водой в запаянном платиновом сосуде и в бомбе с углекислотой показало, что при $700^\circ \pm 50^\circ$ жидкий гранит содержит 6.5% воды. Для сухого гранита Горансоком вычислена температура плавления в $1050^\circ \pm 50^\circ$.

Фогт неоднократно возвращался к гранитам, в частности к составу и плавкости гранитной эвтектики. Он подчеркивает, что каликатровые граниты обладают наиболее низкой точкой плавления из всех изверженных пород. В общем он стоит на точке зрения кристаллизационной дифференциации (прежде он был сторонником магматической дифференциации, но затем стал сторонником дифференциации кристаллизационной), для которой общим руководящим признаком он считает основность более ранних выделений („Erstausscheidungen, Protokristallisation“) и большую кислотность остаточной жидкости („Restmagma“). Но в последней статье о генезисе гранита Фогт (21) считает уже за родоначальную магму не базальтовую (как Дели и Боуэн) и не сиенитовую (как Кларк и Вашингтон), а магму с 65% кремнекислоты. „Die Granite“, говорит он на стр. 206, „sind durch Kristallisationsdifferentiation in der Restmagma-Richtung aus mehr basischen Magmen, sagen wir mit 65% Kieselsäure, entstanden“.

Не совсем понимаю, почему он останавливается на магме, которая по содержанию кремнекислоты примерно соответствует кварцевому диориту. Средний валовой состав земной коры соответствует, как известно, в общем сиениту, а содержание кремнекислоты в 65%, и следовательно состав кварцевого диорита — это состав отдельных материковых участков, между тем как средний состав океанических изверженных пород близок к базальту. Но во всяком случае тот факт, что Фогт производит граниты не от базальтовой и даже не от сиенитовой магмы, а от кислой магмы, можно считать за доказательство того, что он признает существование кислой магмы, как таковой.

Подводя итоги всему, что было сказано, можно прийти к заключению, что наиболее естественно граниты объясняются при допущении непосредственной их кристаллизации из кислой магмы и что поэтому наиболее правоподобно существование, наряду с общепринятой базальтовой, также и самостоятельной кислой магмы в местах формирования гранитов.

II. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

Перейдем теперь к вопросу о причинах разнообразия изверженных пород.

Возможны четыре объяснения разнообразия изверженных пород:

1. Каждая порода происходит из особой магмы (эта точка зрения вряд ли кем-либо поддерживается в настоящее время).
2. Причиной этого разнообразия являются процессы дифференциации одной единой или нескольких родоначальных магм.
3. Причина кроется в ассимиляции.
4. Причиной является смешение разных магм в различных отношениях.

Остановимся прежде всего на дифференциации. Можно строить разные гипотезы процессов дифференциации априорным путем, исходя из представлений о природе магмы, из аналогий, из экстраполяции экспериментальных работ с силикатами. Все это сыграло свою роль и еще продолжает действовать. Но для создания конкретной базы для гипотез о дифференциации надо идти другими путями; эти пути: 1) геолого-петрографическое изучение петрографических формаций и провинций; 2) изучение химизма петрографических комплексов (дифференциационные кривые и т. п.).

Проверкой и некоторой директрисой для гипотез дифференциации являются экспериментальные работы. Придавая огромное значение эксперименту вообще и экспериментальным работам с силикатами изверженных пород и с их воспроизведением в лаборатории (начиная с опытов Фуке и Мишель-Леви и кончая работами Геофизической лаборатории в Вашингтоне), следует однако относиться с должной критикой

и осторожностью к экстраполяции результатов этих опытов с упрощенными системами на сложнейшие процессы в природной магме. Не следует впадать в этом отношении в ошибку Моора, который в своем увлечении восклицал, что достаточно одного тигля, чтобы опровергнуть все теории ненавистных ему плутонистов.

При большом разнообразии процессов дифференциации можно все их свести к двум группам:

1) дифференциация в жидком состоянии до начала кристаллизации, так называемая, магматическая дифференциация в тесном смысле слова;

2) дифференциация во время и при посредстве кристаллизации — так называемая кристаллизационная дифференциация.

В пределах каждой из этих групп наблюдается большое разнообразие процессов, требующее некоторой систематизации.

Классификация процессов дифференциации, как и процессов метаморфизма, может исходить из разных оснований. Остановим свое внимание на некоторых из них.

1. Классификация фациальная, т. е. по глубине залегания дифференцирующейся магмы:

- а) абиссальная и гипабиссальная (Брёггер);
- б) глубинная и асцензионная, или анабантическая (Левинсон-Лессинг).

2. Классификация по фазам:

- а) магматическая (концентрационная и ликвационная): жидкость и жидкость;
- б) кристаллизационная: жидкость и кристаллы;
- в) газовая (Мишель-Леви и gaseous transfer Феннера): жидкость и газ.

3. Классификация по факторам, управляющим дифференциацией:

- а) гравитационная дифференциация: жидкость и кристаллы; жидкость и жидкость;
- б) газовая дифференциация;
- в) механическая дифференциация.

4. Классификация по возбудителям, вызывающим дифференциацию:

- а) простое охлаждение;
- б) ассимиляция;
- в) дистилляция.

Независимо от той или иной группировки явлений дифференциации, главнейшие процессы, которыми осуществляется дифференциация, сводятся к следующему: фракционированная кристаллизация и кристаллизационная дифференциация, отжимание, ликвация, газовый перенос. На них мы вкратце и остановим свое внимание.

Кристаллизационная дифференциация

Начнем с кристаллизационной дифференциации.

Поскольку кристаллизация магмы обыкновенно совершается не сразу, а постепенно, т. е. минералы выделяются из магмы в известной последовательности, кристаллизационная дифференциация должна всегда наблюдаться в той или иной форме. Это было установлено еще известной работой Лагорио и многими другими. Но вопрос сводится к размерам кристаллизационной дифференциации и к тому, как может на разных стадиях кристаллизации произойти отделение уже закристаллизовавшейся части магмы от той, которая еще находится в жидком состоянии и отличается по своему составу от первоначальной магмы. Другими словами, вопрос сводится к тому, как перейти от микродифференциации внутри одной породы к макродифференциации исходной магмы на отдельные породы. Для осуществления этого разделения необходимо участие подсобных факторов, каковы, как известно, гравитационная сортировка, отчасти закалка по Боуэну. И здесь немало разногласий, на которых мы можем остановиться лишь отчасти. Так, мы уже видели, что кислые породы не могут быть выведены путем кристаллизационной дифференциации из основной магмы. Как увидим дальше, есть затруднения и с анортозитами.

Одним из доказательств кристаллизационной дифференциации является сопоставление, говорящее о том, что одна порода из другой может быть выведена путем прибавления или вычета определенных минералов. Но ведь такая миграция минералов может быть осуществлена не только кристаллизационной, но

и магматической дифференциацией в тесном смысле слова, если принять во внимание взгляды мои и Брёггера, одновременно и независимо друг от друга нами высказанные, а именно, что при дифференциации в жидкой фазе передвигаются не отдельные окислы, а группы окислов и кремнекислоты, соответствующие силикатам изверженных пород, т. е., иными словами, в магме на известной стадии наблюдается не диссоциация, а ассоциация.

Пределы применимости кристаллизационной дифференциации в чистом виде с гравитационной сортировкой вкрапленников в лавах, согласно первоначальной установке Дарвина и Пулет-Скрона, не столь значительны, как это иногда принято считать. Вполне реально такая дифференциация сказывается в распределении вкрапленников в лавах или в интрузиях во время движения магмы, как это было хорошо разобрано А. А. Полкановым на асимметричной диабазовой дайке в Мурманском крае.¹

Но для значительной дифференциации в крупных размерах кристаллизационная дифференциация в чистом виде неприменима, приходится искать коррективов или дополнений. Таким дополнительным реальным фактором дифференциации в ходе кристаллизационной дифференциации является процесс, которому впервые должное значение придал Швейг (92). Если первые кристаллические выделения тонут в магме и, попадая в нижние более горячие слои магматического бассейна, там растворяются, то получается внизу более тяжелая жидкость, смешению которой с верхней более легкой путем диффузии будут препятствовать вязкость и большие потребности для этого промежутки времени. В результате оба слоя могут кристаллизоваться раздельно; получаются две породы, из которых каждая кристаллизовалась из отдельного расплава. Но эти два расплава получились из одной родоначальной магмы, однако не путем ликвации, и они не являются жидкостями с ограниченной смешиваемостью (см. Daly, 62, стр. 327). Явление, отмеченное Швейгом, прямо или косвенно допускается разными авторами. Характерно, что его иногда описывают вновь без ссылки на Швейга, быть

¹ Примеров этому много; мною лично это было отмечено на олонекских диабазах (слон, богатые вкрапленниками плагиоклаза или авгита) и на лавах Везувия (одни богаты вкрапленниками авгита, другие лейцита; это было иллюстрировано мною и экспериментально, см. мои „Исследования по теоретической петрографии“, 98).

может потому, что о нем забыли. Такова, например, картина в известном мемуаре нескольких авторов (Томас, Бейли и др., 86) об острове Мэль (Mull)). На стр. 33 они говорят: „Our own suggestion as regards magma-sequence in composite intrusions is a variant of the remelt hypothesis, in that it involves remelting of a special type as a preliminary condition“, а затем следует описание процесса, как у Швейга, но без упоминания о нем.

У них характерно допущение одновременно основной и кислой магм и самостоятельного их внедрения.

Фогт (93) тоже придает большое значение растворению первых выделений, т. е. явлению Швейга, но не цитирует его.

К соображениям против кристаллизационной дифференциации, как универсального и единственного объяснения процессов дифференциации, которые были высказаны разными авторами в том числе мною и Феннером, этот последний в работе о Катмае (36) присоединяет еще одно. В серии Катмая ход дифференциации изображается прямой линией; а линии, которые получились бы по схеме погружения кристаллов, должны обладать переломами в местах появления новых минералов (стр. 768).

К числу возражений против преувеличенной оценки значения кристаллизационной дифференциации следует присоединить еще и следующие соображения:

1. Должны были бы часто встречаться ультраосновные породы, как сопряженный противовес кислым дериватам от основной магмы, если из нее действительно получают кислые породы.

2. Трудность объяснения переходных типов между кислыми и основными извержениями, что лучше объясняется гипотезой смешения.

3. Почему базальтовая магма не всегда дифференцируется? Вспомним базальты плато и сибирские траппы. Это представляется мне одним из существенных возражений.

Соображения о том, что граниты не могут быть выведены из базальтовой магмы путем кристаллизационной дифференциации, были приведены уже выше, и мы к ним возвращаться не будем.

В результате приведенных соображений мы приходим к следующему заключению.

При всей реальности кристаллизационной дифференциации, которую мы не можем не считать одним из факторов дифференциации, она одна сама по себе не охватывает всей совокупности процессов дифференциации.

Ликвация

Со времени Дюроше и затем Бэкстрема ликвация рассматривалась рядом петрографов, в том числе и мною, как один из факторов дифференциации. Фактической основой для гипотезы ликвации являются, как известно, следующие факты: 1) ликвация плака и штейна в металлургическом процессе, 2) установленная химиком Алексеевым для целого ряда жидкостей, неограниченно смешивающихся выше некоторой определенной температуры, способность самопроизвольно распадаться на два несмешивающихся слоя при соответствующем понижении температуры, 3) способность некоторых растворов распадаться на два слоя от примесей (указанное химиком Смирновым действие щелочных растворов на раствор изомасляной кислоты в воде).

Способность ассимиляции вызывать ликвацию легла в основу моей синтектически-ликвационной теории дифференциации (98 и 71) и теории ассимиляции-ликвации Дэли (6). В область магматических процессов представления о ликвации переносятся по аналогии, а также на основании толкования некоторых структур и полевых взаимоотношений различных членов некоторых комплексных петрографических формаций. Я всегда защищал вероятность этого явления и подкреплял его разными фактами и соображениями. Однако большинство петрографов, особенно с тех пор, как концепция кристаллизационной дифференциации получила в освещении Боуэна широкое распространение, относилось в последнее время отрицательно к ликвации магмы. Тем более знаменательно, что в последние годы были отмечены факты, говорящие в пользу этого представления, и нередко можно встретить голоса в пользу его. Постараюсь привести здесь то, что мне стало известно в этом направлении.

Феннер в работе об остаточных жидкостях (1) пишет: „Liquid immiscibility, formerly much favoured by some geologists, is apparently of very limited application in dry melts, but may be of more importance in natural magmas, though the evidence so far brought forward does not appear convincing“.

Далее следует упомянуть Сундиуса (43), который объясняет различие состава шведских лептитов и резкое разграничение микроклиновых и альбитовых лептитов (древних липаритов) ликвацией в жидком состоянии, причем допускает непонятную для меня несмеси́мость полевых шпатов.

— По Сундиусу плагиоклазовые аплиты и микроклиновые аплиты, находящиеся совместно в одной породе, взаимно нерастворимы.

Сундиус сам не употребляет термина ликвация, но его указания на то, что дифференциация щелочей совершилась в жидком состоянии (подчеркнуто им) и что обе породы одновременны, нельзя понять иначе, как проявление несмеси́мости.

Эскола трактует это совершенно иначе и притом довольно сложной комбинацией, а именно выделением натрия в виде карбоната, благодаря чему остается калиевая магма, а затем путем автометаморфизма образуется натровая. Объяснение Гольдшмидга, сводящееся к раннему выделению калия в биотите, и проще и понятнее.

Частичную несмеси́мость („immiscibility“) со ссылкой на меня и на Дэли допускает Томкеев (35), имея в виду сухую магму и магму, более или менее богатую водой и газами („dry and wet“), а также полосатые габбро (ссылки на Харкера, Тиля, Гики и меня). Это напоминает объяснение, которое когда-то дал Идлингс для полосатых автакситовых липаритовых стекол, считая полосатость результатом вытягивания при течении магмы участков, богатых водой и газами и бедных ими, и приписывая им, очевидно, способность не смешиваться. И на самом деле, мне кажется, что газовая составная часть магмы и вода могут быть причиной несмеси́мости, а следовательно и дифференциации, играя в данном случае ту роль, которую я приписываю (109), ссылаясь на опыты Смирнова, посторонним веществам, способным вызывать ликвацию. Аналогичную роль приписывает газам и Дэли в его „two-phase convection“.

Принцип несмеси́мости применяет и Барт (41) к образованию пегматитов, однако, в своеобразной форме: он считает, что канадитовые и плюмазитовые пегматиты произошли из двух несмешивающихся производных магм, одной жидкой и одной газообразной („flüssig und fluid“) и что некоторые гранитовые пегматиты произошли из флюидной магмы. Барт приводит

и другие примеры неомогенных магм со ссылкой на Колони, Сундиуса, Фойя и др. (стр. 120—121). Так, по Колони (42), магматические рудные жилки („Aderu“) в грэнвилльских отложениях находятся в таком состоянии, что необходимо допустить расщепление пегматитового дифференциата на кислую и основную части.

— Много других примеров приводит Дэли в своей последней книге (62, стр. 328).

К ликвации прибегает и Рэд (87), пока не будет доказана ее невозможность, говорит он, для объяснения полосатых структур и ассоциации пород в габбровой формации Абердина; интересно, что он подчеркивает здесь самостоятельность интрузии анортозитов.

Характерный пример ликвации представляют сферолитовые породы, как основные (вариолиты), так и кислые (липаритовые стекла и др.). По отношению к вариолитам этот взгляд уже давно был высказан мною (54); он получил новое подтверждение в последней моей статье о алгубском вариолите (55); он признается, хотя с некоторой оговоркой, и Белянкиным (56).

Если многие авторы отрицают ликвацию для силикатных магм, то с другой стороны некоторые склонны допускать ограниченную смесимость даже в пределах силикатов одной группы или одного семейства. Гейер (59) в своей последней работе о Кирунаваре тоже прибегает к несмесимости. Он останавливается на таком объяснении магматического происхождения магнетитовой руды: руда образовала остаточную магму и оставалась жидкой после того, как главная масса родоначальной магмы уже затвердела в виде горной породы.¹ При этом он допускает, что полевои шпат был нерастворим в этой магнетитовой магме.

Определенным сторонником ликвационной дифференциации является Асклунд (64) для комплекса „Stavsjö“ (граниты, кварцевые диориты, сиениты, нориты).

Частичную несмесимость допускает и Зедергольм (89) при образовании шаровых структур, которые однако, мне кажется, удовлетворительно объясняются и без этого допущения ксенолитной гипотезой Хрушова (90) и автоксенолитной гипотезой

¹ Этот взгляд был уже высказан Штупцером 20 лет тому назад, а мною еще раньше в работе о горе Благодати.

моей с О. А. Воробьевой (91). К расслоению в жидком состоянии при образовании диабаза, пикрита и тешенита апеллирует Флетт (94).

Грейг (76) установил несмесимость в силикатных расплавах при высоких температурах и при высоком содержании кремнекислоты; не смешиваются с кремнекислотой при этих условиях CaO , MgO , FeO , Fe_2O_3 , а Na_2O , K_2O , Al_2O_3 смешиваются. Отсюда Боуэн (11) делает вывод, что в лабораторной обстановке удалось установить несмесимость только в исключительных случаях, но очевидно ее уловили бы и в других случаях, если бы она существовала. Это возражение неубедительно по тем же соображениям, по которым, как уже было указано выше, нельзя результаты опытов с упрощенными сухими силикатными расплавами целиком и безоговорочно экстраполировать на сложные природные магматические расплавы.

Можно назвать еще Ниггли, Эванса, Граута (111),¹ Лодочникова, Берга (112) и др.

На фоне приведенных здесь примеров и многих других, здесь не упомянутых, невольно всплывает вопрос: почему постоянно возвращаются к представлению о ликвации, несмотря на то, что экспериментально ее для силикатных расплавов в должной форме воспроизвести пока не удалось? Очевидно потому, что есть явления, которые другими гипотезами не объясняются с достаточной убедительностью, и потому, что аналогия невольно ведет нас по этому пути. В гипотезе ликвации есть несомненно здоровое зерно, хотя она отнюдь не является какой-то всеобщей панацеей.

Я убежден, что ликвация в тех или иных случаях лучше всего объясняет и некоторые структуры, и ассоциации магматических пород, но она не является единым универсальным толкованием явлений дифференциации; и, признавая ликвацию, я никогда не отрицал и не отрицаю реальности кристаллизационной дифференциации.

Концентрационная дифференциация

Дифференциация в жидкой фазе, до начала кристаллизации, может совершаться не только путем ликвации, но и при по-

¹ На стр. 250 он говорит: „The field evidence is strong but not entirely conclusive for immiscibility in magmas“.

мощи некоторых других явлений. Ограничимся лишь несколькими замечаниями относительно двух предположений, к которым уже прибегали петрографы (Тиль и др.). Первое — это так называемое правило Сорэ (или Лудвига-Сорэ), т. е. возрастание концентрации в более холодных частях растворов. С моей (98, стр. 197) и Брёггеровской (99, стр. 301) поправкой, с толкованием Белянкина (100) и при свете опытов Эйлера (101) и Весельса (110)¹ краевая дифференциация в некоторых интрузивных телах, вероятно, может быть отнесена за счет этого процесса. Второе предположение — это указанная Брёггеру физиком Биркеландом возможность возникновения в охлаждающейся магме термотоков и перенос некоторых составных частей в жидкой магме этим путем. Нельзя, повидимому, пренебрегать и этим предположением, как одним из возможных факторов магматической дифференциации в жидкой фазе.

Отжимание

Многие авторы (Harker, Bowen, Eskola, Daly) видят один из серьезных факторов дифференциации в отжатии еще жидкой части магмы от уже закристаллизовавшейся² („squeezing out, filter-pressing“).

Мне кажется, что тут есть некоторое недоразумение. Если произошла осадка кристаллов и над ними имеется свободная от кристаллов магма, эта последняя может быть отделена от кристаллов тем или иным процессом интрузивного движения. Но если мы имеем магму, богатую кристаллами, т. е. тесную смесь жидкости и кристаллов, нечто вроде губки, как в свое время это изображал Харкер, то об отжатии не может быть речи. Отжатие могло бы иметь место, если бы оно шло через проницаемую для магмы перепонку или через каналы меньшего диаметра, чем плавающие в магме кристаллы. В противном случае по направлению выжимания жидкости будет идти не только

¹ В стеклах.

² Интересно вспомнить, что Дарвин (16), установивший гравитационную дифференциацию, высказал предположение о возможности выжимания в трещины боковой породы жидкой части магмы после отсадки уже выделившихся кристаллов, иначе сказать, о возможности механической дифференциации.

жидкость, но и кристаллы, в ней плавающие, т. е. механической дифференциации не произойдет.

Вспомним опыты Мэда (69), т. е. замкнутое резиновоеместилище, наполненное песком и водой и соединенное со стеклянной трубкой. При деформации такого тела происходит некоторое изменение его объема, вследствие стремления песчинок под влиянием давления принять более плотное расположение. Если можно этим путем отжать некоторое количество воды, то отжать интерстициальную воду, находящуюся между песчинками при наиболее густом их расположении, конечно нельзя. Перенесем это на магму, скажем, на скопление кристаллов лабрадора, выделившихся из основной магмы, которые должны быть отжаты, согласно концепциям Боуэна. Интерстициальная жидкость отжата быть не может, если не допустить полного раздробления и распыления скоплений кристаллов. Мы должны были бы, следовательно, ожидать в анортозитах такой структуры (интерсертиально зажатые между крупными кристаллами плагиоклаза участки закристаллизованной остаточной магматической жидкости), каковая на самом деле не наблюдается, — и это является еще одним соображением против Боуэновской гипотезы происхождения анортозитов.

Некоторые сомнения относительно filter-pressing выражает и Граут (78).

Механическая дифференциация (filter-pressing, winepress-mechanism, squeezing out) разными авторами понимается различно. Мэд (69) дает правильную картину, из которой ясно, что этим путем можно объяснить экзогенные и эндогенные пегматитовые жилки и т. п., но отнюдь не дифференциацию в крупном масштабе. И Боуэн (70), и Харкер и др. по моему неправильно применяют это к явлениям дифференциации: если кристаллизация дошла до образования компактной массы с незначительной интерстициальной жидкостью, — будет лишь явление в масштабе Мэд, а при преобладании жидкости — не будет отжатия, а будет лишь явление, описываемое Полкановым (97) в асимметричной дайке.

Мне кажется, что роль механического отжимания жидкости многие значительно преувеличивают. Но сокращение объема может иметь значение (как в опыте Мэд при изгибании) в процессе складкообразования, исполняя роль как бы присасывания в механизме интрузии.

Об ассимиляции давно говорят в петрографии. Ассимиляция, которую я выставил в 1897 г. как один из существенных факторов дифференциации, сначала многими отвергалась или считалась за явление побочное, незначительное. В настоящее время трудно сказать, больше ли сторонников, или противников ассимиляции, но она во всяком случае получила широкое признание, и значение ее иногда даже переоценивается. Такой переоценкой я считаю и точку зрения Хольмса (20), который рассуждает таким образом: „так как есть много случаев ассимиляции с базификацией кислой магмы и обратно, то, следовательно, это всегда так и только так и происходит“. А почему это не один лишь из возможных случаев?

Одним из решительных противников ассимиляции был Брёггер. В его отношении к ассимиляции произошел, однако, впоследствии резкий поворот, о чем свидетельствует его работа о „Fen-Gebiet“.

При оценке значения и роли дифференциации следует, как и в других аналогичных случаях, избегать переоценки и экстраполяции своих наблюдений, как бы точны и убедительны ни были наблюдения в том или ином районе, индивидуально хорошо известном данному исследователю. Я по этому поводу люблю напоминать студентам разговор между Брёггером и Лакруа, о котором мне рассказывал этот последний: „Приезжайте ко мне в Христианию, и я Вам покажу, что ассимиляции нет“, сказал Брёггер когда они с Лакруа заспорили об ассимиляции. „Приезжайте ко мне в Пиренеи“, ответил ему Лакруа, „и я Вам докажу, что ассимиляция есть“. Оба были, конечно, правы.

Дэли в последней своей книге приводит ряд примеров реально наблюдаемой ассимиляции (62, стр. 292, 301, 319). Вместе с тем, он проводит существенную грань между грандиозными явлениями ассимиляции в архее и сравнительно более слабыми ее проявлениями в послекембрийское время.

Боуэн отрицает возможность ассимиляции основных пород кислой магмой, исходя из того, что в его реакционном ряду минералы кислой магмы стоят за минералами основных пород, а остаточная часть магмы не может растворять более ранние компоненты, которыми она, очевидно, была насыщена. В этом отно-

шении очень показательны наблюдения Феннера (36), согласно которым и на Катмае и в Еллостонском парке имела место значительная ассимиляция андезитов и базальтов риолитами без потери флюидности.

Ассимиляция еще в 1897 г. и затем в 1910 г. постулировалась мною, как один из неизбежных моментов в процессах формирования магматических пород. К этой же точке зрения примкнул и Дэли. Но одно постулировать, другое доказать реальность этого явления в отдельных конкретных случаях. Такие примеры имеются в работах Лакруа, Дэли, Брёггера (Fen-Gebiet), Феннера и многих других. Но насколько эта задача сложна и трудна — можно иллюстрировать хотя бы таким примером: в одном и том же томе *Journal of Geology* помещены три статьи, относящиеся к знаменитому норитовому массиву Сэдбери в Канаде: Бэн (79) допускает очень значительную ассимиляцию, а Фемистер (80) и Боуэн (81) или значительно ее сокращают, или даже отрицают.

Очевидно, требуется накопление фактического материала. Но в том, что ассимиляция в тех или иных случаях является одним из факторов, объясняющих разнообразие изверженных пород, теперь уже сомневаться не приходится.

Смешение магм

Кристаллизационная дифференциация не объясняет промежуточных типов между кислыми и основными породами. Не объясняет этого и ликвация во многих случаях, не говоря уже о том, что гипотеза ликвации часто слышит упрек, что она для силикатных расплавов экспериментально не доказана. Поэтому во многих случаях теперь прибегают к старой гипотезе Бунзена об образовании промежуточных типов путем смешения в разных пропорциях двух крайних типов. К этому объяснению прибегли и мы с Е. Н. Дьяконовой по отношению к древним лавам Карадага (44); об этом говорят Хольмс и Гарвуд (46). Точно так же допускает это и Феннер (36) в работе о Катмае. Прямые линии в дифференциационной диаграмме по его мнению лучше всего объясняются допущением постоянных газовых выделений (*volatilisation, gaseous transfer*), но автор не решается это обобщить и потому допускает участие в дифференциации и газового переноса, и кристаллизационной диф-

ференциации, и ассимиляции, и смешения магмы. Он заканчивает свои рассуждения почти так же, как я свою статью об аномалиях (стр. 771): „There is not yet apparently any complete explanation as to the cause of variation“ и дальше: „It is much better to recognise the situation and be on the look-out for new evidence than to accept any one explanation as a universal applicability“.

Мне кажется, есть случаи, и в особенности в фации эффузивной, когда приходится прибегать и к этому старому толкованию Бунзена, которое он применял к лавам Исландии. Но само собой разумеется, что эта гипотеза никоим образом не претендует на универсальность.

Выводы о дифференциации

Предшествующее краткое критическое рассмотрение разных гипотез о дифференциации с несомненностью приводит нас к заключению о невозможности единой универсальной гипотезы о дифференциации. Это признают не только критики той или иной из существующих гипотез, но и горячие сторонники той или иной гипотезы, как наиболее вероятной или единственно правильной. В этом отношении интересны совершенно правильные признания такого горячего сторонника кристаллизационной дифференциации, каким является Боуэн: из того, что базальт может дать путем кристаллизационной дифференциации все остальные породы, еще не следует, говорит он, что так и есть; решает здесь геология.

Всякому натуралисту свойственно придавать особое значение своим наблюдениям и иногда их переоценивать; в еще большей мере это применимо к тем гипотезам, которые оказались пригодными для объяснения этих наблюдений, и к тем обобщениям, которые из них удалось с успехом вывести. Невольно является стремление перенести свои наблюдения и обобщения на другие случаи и на другие районы, стремление к экстраполяции. Отсюда и опасность догматизма и, я сказал бы, пристрастия. Такое положение вещей очень ярко сказалось и на теориях дифференциации, поскольку многие авторы признают только одно определенное толкование, совершенно отбрасывая другие возможные гипотезы. Здесь необходимо в каждом отдельном случае критически рассмотреть, какие факторы

дифференциации возможны и наиболее вероятны в том или другом отдельном случае, а не подходить к каждому из них с готовой схемой и не стремиться к единому универсальному толкованию.

И магматической дифференциации в жидком виде (т. е. ликвации, явлению Лудвига-Сорэ, и гравитационной дифференциации неоднородных магматических масс), и кристаллизационной дифференциации с гравитационной сортировкой и с переплавлением первых выделений, и газовому переносу, и механическому отжатию, и смешению магм, и ассимиляции принадлежит та или иная, исключительная или подсобная, роль в отдельных случаях дифференциации. Мир магматических пород и явлений дифференциации и их генезиса настолько сложен и многообразен, что без натяжки, без насилия не может быть втиснут в рамки одной единственной гипотезы. Отстаивая в некоторых случаях гипотезу ликвации, я не отрицал для других случаев гравитационной и кристаллизационной дифференциации или роли летучих компонентов, или, наконец, возможности смешения магм. На этой же точке зрения стоит отчасти и Дэли (62, стр. 332), стоит определенно и Феннер (36, стр. 770) и некоторые другие. Должную осторожность и терпимость проявляет, например, Бесков (63), когда говорит, что считает для изученного им района доказанной кристаллизационную дифференциацию, но теоретически допускает возможность и ликвации (стр. 323).

В пределах общей проблемы генезиса изверженных пород есть несколько частных вопросов, которые представляют как бы оселки, пробирные камни, для испытания и проверки пределов применимости и пригодности той или иной теории дифференциации. Сюда относятся: 1) взаимоотношения габбро и гранитов (или общее — кислых и основных пород в районах их совместного нахождения), 2) мономинеральные породы, 3) формация нефелиновых сиенитов и отчасти 4) несиликатные магмы.

Остановимся вкратце на этих вопросах.

Взаимоотношения габбро и гранитов

Как я неоднократно отмечал, наиболее надежным подходом к решению вопроса о генетических взаимоотношениях гранитов и габбро, т. е. вопроса о самостоятельном существовании

кислой магмы, или о происхождении кислых пород путем дифференциации основной магмы, является детальное изучение сложных батолитов и вообще районов совместного нахождения кислых и основных интрузий. Перед беспристрастно и убедительно установленными фактами должны склониться априорные настроения и экстраполяция лабораторных экспериментальных работ. В петрографической литературе имеется и постоянно пополняется материал по этому вопросу. Не повторяя тех примеров, которые уже были мною приведены выше и в „Петрографии“ (49), останавлиюсь лишь на нескольких новых данных.

Тиррель (106) пишет, что на о. Арране между габбро и гранитом залегают гибридные и смешанные ксенолитные породы. В сложных пластовых интрузиях с кварцевым порфиром и долеритом кварцевой порфир моложе: есть зона с ксенолитами долерита.

По Холлю (107) и Бушвельде гранит моложе габбро и интродуцирует его.

По Гардинеру (108) граниты, тоналиты и основные породы исследованной им области являются результатом отдельных интрузий.

Баррель (65) в своей известной монографии о батолитах говорит, что нигде габбро не соприкасается с большим гранитовым батолитом. Но некоторые факты (налегание андезитов на габбро и следовательно признаки значительной эрозии) говорят за то, что габбро принадлежит значительно более ранней эпохе, чем гранит.

В Чезынском месторождении Западной Сибири кислая интрузия моложе основной (неопубликованные исследования П. И. Лебедева и Г. М. Саранчиной).

Daly (66) собрал данные и сопоставил большое количество примеров состава интрузивных пластов, в которых он видит иллюстрацию гравитационной дифференциации. Он делает отсюда заключение об антагонизме кислых и основных пород, сформулированное следующим образом: *The table illustrates again and again the „antagonism“ between granite and basaltic magmas, which has been so justly emphasized by Loewinson-Lessing; under certain often repeated conditions these magmas become non-convolute and gravitatively separated* (стр. 200). И дальше, резюмируя свои выводы, он приводит в числе пунктов, которые подсказывают или доказывают (*„suggest or demonstrate“*) и сле-

дующий вывод (стр. 201): The «antagonism» between basalt and granite — a principle which seems to have controlled the primitive separation of the earth's acid (granitic) and basaltic sheets.“

В настоящее время Дэли отчасти изменил свои взгляды. Он склоняется к кристаллизационной дифференциации единой базальтовой магмы, а вышеуказанный антагонизм упоминает уже (62, стр. 206) лишь как взгляд отдельных авторов: Loewinson-Lessing, Sederholm and Richardson are among those who think the granitic and basaltic shells of magma may have departed because of a kind of «antagonism» between them. Apparently these authors recognise here an effect of liquid immiscibility, due either to very high temperature or to the presence of much water gas in the original solution“.

В Бушвельдском массиве, по Рейнингу (82), — два самостоятельных пласта, которые принадлежат самостоятельным интрузиям. Правда, при этом он допускает, что они происходят из более глубокого резервуара, где могла иметь место кристаллизационная дифференциация.

Граут (83) говорит о „Chemical discontinuity between the gabbros and «red rocks» of the Duluth series“.

Кротов (84) отмечает для Алапавского округа, что гранитовая магма (граниты и кератофиры) моложе габбро-периодитовой (как интрузивной, так и эффузивной).

Фемистер (85, стр. 26) высказывает относительно известного массива Сэдбери следующие соображения: микропегматит и норит представляют две самостоятельных интрузии: микропегматит внедрился в еще горячие нориты; их взаимоотношения не могут быть объяснены гравитационной дифференциацией, но все же они произошли из одного общего источника. Гранито-гнейсы моложе норита и входят в него многочисленными прожилками.

Как видно, число надежных примеров генетической независимости гранитов и габбровых пород в областях их совместного нахождения постоянно растет. Гранофировая зона на многих габбро и норитах, так наз. „red rock“, как это кажется уже достаточно выяснено, этому отнюдь не противоречит, так как эти незначительные кислые нащепки на более или менее мощных габбровых или норитовых интрузивных телах представляют явление иного порядка и по размерам и по генезису.

Мономинеральные породы

Одним из серьезных вопросов в проблеме генезиса изверженных пород и пробным камнем для всякой петрографической гипотезы бесспорно надо считать мономинеральные магматические породы (анортозиты, пироксениты, дуниты) и формацию нефелиновых сиенитов. Неудивительно поэтому, что к этим вопросам постоянно возвращаются. Некоторые новые работы в этой области представляют интерес и заслуживают рассмотрения.

Начнем с мономинеральных пород, и в частности с анортозитов.

Известное смятение, можно сказать, было внесено в этот вопрос Боуэном (68), который отрицает существование анортозитового расплава, а считает, как известно, анортозит за скопление кристаллов, произведенное гравитационной дифференциацией. Гипотеза Боуэна была подвергнута подробной критике мною (37) и Лодочниковым (102). Не буду повторять наши доводы, относящиеся к протокластической структуре, к контактам, к жильной форме залегания, а также соображения, которые были уже упомянуты выше. К этим прежним соображениям можно теперь прибавить еще одно, высказанное выше, относительно интерстициальной жидкости при отжати.

К взгляду Боуэна примыкает в недавно выпшедшей работе Болк (24), вводящий, однако, в механизмы дифференциации, благодаря которой получается анортозит, новый фактор, а именно задерживающую роль трения (см. также Оллинга, 26). Благодаря трению происходит в краевой зоне движущейся жидкости, в которой плавают уже выделившиеся кристаллы, аккумуляция этих последних. Сначала этот фактор показался мне сомнительным, но из бесед с теоретиками-гидравликами я вынес убеждение, что с ним приходится реально считаться. Вскоре после этого мне самому во время ледохода пришлось наблюдать это явление на Неве: на участках с замедленным течением происходит накопление льдин. Этим путем можно объяснить неравномерное распределение крапленников в некоторых случаях. Но представление о том, что материнская магма, в которой уже были кристаллы лабрадора и железисто-магнезиальных минералов, внедрившаяся снизу по наклонной плоскости, могла этим путем дать начало анортозитовому

массиву, площадью в 1200 кв. м, плохо мною воспринимается. Впрочем сам Боуэн прибегает еще к помощи отжата. Между анортозитом и сиенитом, между анортозитом и габбро существуют постепенные переходы; все они произошли из одной общей магмы, более кислой, чем габбро. Болк считает все эти породы одновременными, отрицает, что габбро моложе анортозита, как это указывают Гильсон и Каллахан (25). Все это понятно, но мне непонятно применение Болковского механизма к образованию анортозита, если принять во внимание, что среди анортозитов залегает множество сфероидальных и яйцевидных тел габбро. И не говорят-ли флюидальные явления, заснятые автором, скорее об анортозитовой жидкости, захватившей отдельные уже закристаллизовавшиеся габбровые тела? Оллинг тоже отмечает флюидальность („magmatic flowage“) анортозита и допускает, что анортозитовая жидкость лучше всего объясняет явления; мне только непонятно, как эти положения мирятся у него с толкованием Болка, к которому он в общем присоединяется, хотя кое-что и критикует. Моудслей (27) в более ранней работе тоже требует анортозитовой жидкости. Таким образом мы видим, что по мере углубления в геологические соотношения накапливаются данные в пользу реальности анортозитового расплава, а не в пользу толкования Боуэна.

Возражение Боуэна, основанное на отсутствии анортозитовых стекол, неубедительно; стекол нефелиновых сиенитов тоже нет.

Бесков (63), рассматривая соотношение удельного веса плагиоклаза и габброноритовой массы, из которой, по его словам, произошел анортозит (стр. 257), приходит к следующему заключению (стр. 260): „Die Anorthosite können nicht durch Kristallisationsdifferentiation in der Richtung die Bowen und Vogt angenommen haben durch sinkenden Plagioklas gebildet sein, dagegen wird Goldschmidt's (und Loewinson-Lessing's) Annahme von steigendem Plagioklas in höchsten Grade bestätigt“.

В резюме еще не опубликованного доклада на конгрессе в Вашингтоне Кольдеруп (96) подчеркивает безусловно интрузивный характер анортозитов и говорит о жилах анортозитов и других основных пород, секущих анортозиты.

Большой интерес с точки зрения оценки разных толкований дифференциации представляют, как уже сказано, также

дунит, формация нефелиновых сиенитов, а также несиликатные магмы (фенролиты, сульфидолиты, карбонатиты, кварцолиты). К сожалению, недостаток времени лишает меня возможности рассмотреть и их.

Еще одно последнее замечание о дифференциации. Daly (62, стр. 287) считает дифференциацию за процесс обратимый; мне кажется, что это неверно. В тех случаях, когда толчком, вызывающим дифференциацию, является ассимиляция или дистилляция, об обратимости процесса не приходится говорить. Что касается дифференциации, вызываемой прогрессивным охлаждением магмы, в сухой магме, можно, пожалуй, говорить об обратимости этого процесса, пока не произойдет механического отделения той или иной части дифференцированной магмы. Но когда дифференциация сопровождается выделением летучих компонентов, поскольку она сопровождается или вызывается ассимиляцией, об обратимости процесса, конечно, не может быть речи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Какие же можно сделать выводы из всего сказанного?

Ни одна гипотеза сама по себе не охватывает полностью всей проблемы: необходимо допустить комбинации разных процессов. В этом отношении правильны рассуждения Боуэна по этому вопросу, но неправилен его вывод, что только гипотеза кристаллизационной дифференциации имеет под собой здоровое научное основание.¹

В конкретных случаях действуют отдельно или совместно следующие процессы: кристаллизационно-гравитационная дифференциация, кристаллизационно-солюционная (т. е. явление Швейга), диффузионная (т. е. принцип Сорэ), ликвационная, дистилляционная, синтексис. Причиной дифференциации являются: охлаждение, ассимиляция, дистилляция. Регуляторы дифференциации: энтропия, приблизительное постоянное число молекул в единице веса и ограниченность разнообразия химических типов изверженных пород.

¹ Невозможность охватить все явления дифференциации одной гипотезой и необходимость допущения разных объяснений признают Дали (62, стр. 332), Феннер (36, стр. 770) и Граут (111, стр. 258).

Первоначально строились априорные гипотезы. Теперь мы имеем существенную помощь в эксперименте, в геохимии, в геофизике. Но каждый из этих методов не обходится без аналогии и экстраполяции. Наличие экстраполяции признает и такой рьяный сторонник доминирующего значения эксперимента, как Боуэн (70). Значение и пределы применимости эксперимента определяются, как уже было отмечено, тем, что нельзя результаты работ с упрощенными сухими расплавами безоговорочно переносить на толкование магматических процессов. Эти работы безусловно важны и необходимы, и заслуга Вашингтонской геофизической лаборатории в этом отношении велика.¹ Но эти опыты дают лишь некоторую основу для будущих экспериментов со сложными системами при участии летучих компонентов и высоких давлений; нельзя не учитывать роли летучих компонентов. Это лишь первое приближение, *sujet à révision*, как об этом свидетельствует уже отмеченный Тиллейем факт, что даже в простейших экспериментально изученных системах найдены некоторые комбинации, которые не встречаются в природе, и наоборот, не получены такие, которые в природе существуют. Нельзя забывать, что хотя магма и раствор, но раствор особого рода, в некоторых отношениях существенно отличный от водных и других низкотемпературных растворов и близко стоящий к расплавам солей и металлическим сплавам.

Невольно взоры обращаются к новым методам, которые могли бы нам прийти на помощь при решении некоторых вопросов петрогенезиса. Из этих новых методов следует отметить следующие:

1) Определение возраста пород по содержанию в них гелия; попытка сделана Хольмсом.

2) Применение количественных отношений изотопов некоторых элементов для освещения генетических взаимоотношений магматических пород, в частности отношения $\text{Ca}_{41}:\text{Ca}_{40}$ по магнито-оптическому методу Аллисона, как это было сделано Хольмсом.

¹ Работы Дельтера и его учеников были начаты до организации Вашингтонской лаборатории, а работы СПб. Политехнического института приблизительно одновременно с нею (103).

3) Геофизические методы и в частности электробурение по методу Шлумберже, как это уже поставлено на очередь комиссией при Академии Наук.

4) Статистические методы. „Категорическое исчисление“, как это отмечено Чупровым (104), помогает нам вскрывать закономерности там, где неприменима обычная индукция, и им, конечно, не следует пренебрегать и в петрологии. Статистикой пользовался уже Кларк и его последователи. Вариационная статистика уже применяется к характеристике и разграничению типов изверженных пород как по химическому составу, так и по минералогическому.

Но решающий голос в петрогенетической проблеме остается за геологией. Необходимость детального изучения комплексных интрузивных и эффузивных формаций диктуется сама собой, и его значение может быть иллюстрировано многими примерами.

Необходим и количественный учет изверженных пород на местах древних щитов и древних геосинклиналей; целесообразен подход именно с этой стороны, так как обнаружилось отличительные особенности между материками и древними синклиналями и вместе с тем ошибочность учения об универсальных провинциях, тихоокеанской и атлантической с разными поправками к ним.

Конечно, и при толковании геологии и возрастных взаимоотношений горных пород в комплексных интрузиях или в отдельных формациях и провинциях возможны, и на самом деле наблюдаются, расхождения; возможны и разные индивидуальные толкования. Поэтому, было бы очень важна научная кооперация в этом отношении как внутри страны, так и в международном масштабе. Примеры такой кооперации имеются: это экскурсии некоторых зарубежных научных обществ; это экскурсии международных геологических конгрессов; к научной кооперации призывал геологов Гики, кое-что в этом направлении в свое время предпринято было и международной ассоциацией Академий Наук.

В связи с этим надо отметить незнание иностранцев с русскими работами или игнорирование их. Отсюда вытекает такой вывод: необходимо заботиться о реферировании русских

работ за границей, о создании специального периодического органа по петрографии.

В учении о дифференциации и генезисе магматических пород наблюдается, как и во многих других случаях в естествознании, чередование эпох собирания фактов и эпох обобщений, а также смена разных направлений. Настоящее время — эпоха сравнительно-геологического и геохимического подхода к этой проблеме, причем большая роль одновременно принадлежит также эксперименту и гипотезе, тому, что я называю научной фантазией. Требуется еще большая кропотливая работа, но некоторые закономерности уже выяснены или выясняются, и петрография, как наука описательная, идиографическая, уже уступила свое место петрологии, как дисциплине номографической. За последние 50 лет корабль петрографии совершил длинный путь по безбрежному океану научных исканий, не раз меняя свой курс, и я сам иногда в некоторой степени участвовал в повороте его руля. Естественно, что мои взгляды менялись на протяжении этих десятилетий. Но многое осталось и из моих первоначальных взглядов, высказанных еще в 1897 г. (98), а затем в 1910 г. (71); их иногда подтверждают с упоминанием моей фамилии или без упоминания.

Итак, мы еще не имеем общепризнанной теории генезиса магматических пород, несмотря на то, что некоторые взгляды горячо отстаивают те или иные корифеи нашей науки и поддерживают многие петрографы. Не имею и я в данный момент такой законченной категорической теории, как в 1910 г. Но чтобы избежать натяжек и односторонности, лучше признать, что ни одна теория нас полностью не удовлетворяет.

Статью об анортозитах (87) в 1923 г. я закончил такой фразой: „It were better for this problem to remain an unsolved riddle to stimulate further investigations than to become, if unilaterally solved, a possible source of dogmatism“. Примерно в этих же словах впоследствии высказался и Феннер относительно кристаллизационной дифференциации единой базальтовой магмы. И, конечно, правильно распространить такое суждение и на всю проблему генезиса изверженных пород в целом. Быть может это и не так печально, как кажется с первого взгляда, ибо еще Гёте сказал, что „стремление к истине прекраснее обладания истиной“ — прибавим, особенно, если эта истина недостоверна.

ВЫВОДЫ

Нами рассмотрено не все, что нужно для полного освещения проблемы генезиса изверженных пород, многое осталось неразобранным, как, например, механизм интрузии, связь петрогенеза с орогенезом и эпейрогенезом, последовательность вулканических извержений. Много дало бы нам рассмотрение вулканических циклов, некоторых теорий горообразования, приписывающих основную роль в этом процессе магме (Амферер, Швиннер), осцилляционной теории Хармана и ундуляционной теории Ван-Беммелен, связи дифференциации с разными стадиями тектонического становления интрузии, отмечаемой Бубновым (12) и многое другое. Но на это сегодня нет времени.

Из всего сказанного видно, как сложна и многогранна наша проблема и какие интересные перспективы она сулит. И вы могли, я надеюсь, убедиться в том, что учение о магматических породах не застыло на тех или иных догматах, а все время ищет новых путей. Эти искания являются залогом прогресса и серьезных успехов в недалеком будущем.

Хотелось бы все-таки сделать теперь некоторые обобщающие выводы. Мне кажется, что намечается возможность некоторой эклектической, удовлетворяющей нас в данный момент, петрогенетической концепции магматических пород.

1. Наиболее удовлетворительно разнообразие изверженных пород и их геологические взаимоотношения объясняются при допущении двух отдельных родоначальных магм, кислой и основной.

2. Ни одна теория дифференциации, исходящая из одного фактора, в том числе и излюбленная теперь теория кристаллизационной дифференциации, не охватывает всей совокупности процессов дифференциации без натяжек. Приходится считаться и с кристаллизационной дифференциацией в разных ее проявлениях, и с ликвацией, и с ассимиляцией, и с некоторыми другими доказанными или возможными факторами дифференциации.

3. Существуют три категории магматических пород:

1) Породы, представляющие продукт непосредственной кристаллизации магмы. Эти прототектиты отличаются значительным однообразием на большом протяжении и зна-

чительными размерами. Для основной магмы это массовые лавовые излияния, так наз. базальты плато и интрузивные долериты, например, сибирские траппы, габбро-перидотито-пироксенитовые и габбро-сиенитовые формации. Для кислых пород это мощные гранитовые интрузии, обыкновенно более или менее богатые пегматитовой фацией, а также массовые кислые излияния. Это магматические образования без признаков дифференциации или дифференцированные, часто в связи с значительной ассимиляцией.

2) Анатектиты и вместе с тем схизолиты, т. е. породы, получившиеся путем переплавления более древних участков земной коры и последующей дифференциации. Анатектические магмы могут иметь состав случайный. Они непременно сопровождаются дифференциацией, ибо, как уже сказано, изверженные породы, при всем их разнообразии, представляют не случайные, какие угодно, химические и минералогические, а лишь некоторые вполне определенные ассоциации, ограниченные и регулируемые некоторыми закономерностями.

3) Синтектиты, продукты смешения магм, без последующей дифференциации или продукты ассимиляции магмой посторонних масс, сопровождаемой дифференциацией.

Это, так сказать, некоторая общая канва, в которой до известной степени переплетаются мои собственные взгляды со взглядами других, в особенности Daly, взгляды которого до появления его новой книги во многом были близки к моим. Принадлежность всякой конкретной петрографической формации к той или иной из этих групп определяется степенью ее изученности и тем или иным толкованием наблюдений. И здесь, конечно, возможны разногласия, и дело не обходится без известной субъективности, без некоторой доли научной фантазии и интуиции. В каждой научной дисциплине в области естествознания, химии и физики прогресс совершается не только тщательным наблюдением явлений и экспериментов, т. е. собиранием, изучением и классификацией фактов, но и их толкованием, т. е. построением научных гипотез, всегда в известной мере субъективных и носящих ха-

рактер научных фантазий. Грешен в этом отношении и я. Отмечали известную субъективность в моей „Петрографии“. Я проявил ее, конечно, и в сегодняшнем докладе. Но я не считаю это заслуживающим упрека, ибо без некоторой доли субъективизма и фантазии наука была бы суха и почти мертва. Научная фантазия (105) является, наряду с наблюдением и экспериментом, существенным фактором познания. Фантазия—истинный творческий элемент не только в изящной литературе и в искусстве, но также в науке и в технике.



ЛИТЕРАТУРА

1. C. Fenner. The residual liquids of crystallising magmas. *Min. Mag.*, XIII, 1931, 539—560.
2. A. Holmes. The problem of the association of acid and basic rocks in central complexes. *Geol. Mag.*, XVIII, 1931, 241—55.
3. T. Krokström. On the aplite structure and the order of crystallisation in basaltic magmas. *Bull. Geol. Inst., Upsala*, XXIV, 1932, 197—216.
4. W. Benson. The tectonic conditions accompanying the intrusion of basic and ultrabasic igneous rocks. *Mem. Nat. Acad. Sci., Washington*, 1926, XIX, № 1, 1—90.
5. A. Lane. Segregation granites. *J. of G.*, 30, 1923, 162.
6. R. Daly. *Igneous rocks and their origin*. 1914.
7. Tröger. Zur Sippenteilung magmatischer gesteine. *N. J. Beil.*, Bd. 62, 2. A., 249—330.
8. B. Cotta. *Geologische Fragen*. 1858, 76.
9. A. Lane. Origin of granites by selective solution. *Id.*, XXIV, 1913, 704.
10. J. Sederholm. On regional granitization (or Anatexis), 12-th Geol. Cong., 319, Canada, 1913, 319.
11. L. Green. *Vestiges of the molten globe*. 1887, 11.
12. S. v. Bubnoff. Der Werdegang einer Eruptivmasse. *Fortschr. d. Geol.*, Bd. VII, Heft 20, 1928.
- 12a. S. v. Bubnoff. *Die Gliederung der Erde*. 1923, 47.
13. Schwarz. Contribution to the aqueo-igneous solution theory of rock magmas. *Trans. Geol. Soc. S. Africa*, XV, 1912, 115.
14. F. Grout. Origin of the igneous rocks of Minnesota. *J. of G.*, XLI, 1933, 196.
15. J. Sederholm. Om Granit och Gneiss. *Bull. Com. Géol., Finl.*, № 23, 1907, № 6, 1928.
16. Ch. Darwin. *Volcanic Islands*. 1844.
17. A. Lane. Wet an dry differentiation. *Tuft's College Studies*, III, Pt. I.
18. W. N. Benson. Connection between the development of igneous rocks and crust-movements in Austral-Asia. *Proc. of the Pan-Pacif. Sc. Congr., Australia*, 1923, 757.
19. P. Escola. On the origin of granitic magmas. *T. M. P. M.*, 1932, 42, 51, 455.
20. A. Holmes. The origin of igneous rocks. *Geol. Mag.*, LXIX, 1932, 543,

21. J. Vogt. Die Genesis der Granite physikochemisch gedeutet. Z. d. g. G., 88, 1931, H. 4, 193.
22. F. v. Wolff. Das Temperaturgesetz in der Erdkruste. Jahrb. aus dem Verbands für die Erforschung der mitteldeutschen Bodenschätze, Bd. 7, N. F., 1928.
23. M. Lugeon. Sur l'origine du granite. C.-R. Ac. d. Sc., 190, 1930, p. 1096.
24. R. Balk. Structural survey of the Adirondack anorthosite. J. of G., 1930, 289.
25. Gilson. W. Callahan, W. Millar. The age of certain of the Adirondack gabbros. J. of G., XXXVI, 1928, 149.
26. H. Alling. The Adirondack and its problems J. of Geol., 1932, 193.
27. J. W. Mawdsley. Geol. Surv. Mem., 1927, 152.
28. C. Fenner. The crystallisation of basalts. Am. J., 18, 1929, 225.
29. N. Sundius. On the differentiation of the alkalies in aplites and aplitic granites. Sver. Geol. Unders. Sci. C., № 336, 1926.
30. P. Escola. Conditions during the earliest geological times as indicated by the archæan rocks. Ann. Acad. Fenn. A., XXXVI, № 4, 1932.
31. J. Greig, E. Shepard and H. Mervin. Melting granite and basalt in the Laboratory. Bull. Geol. Soc. Am., XL, 1929, 94.
32. K. Goranson. Some notes on the melting of granite. Am. J., 1932, 227.
33. J. Vogt. Die Genesis der Granite physikochemisch gedeutet. Z. d. g. G., 83, 1931, 193.
- ✓ 34. Ф. Левинсон-Лессинг. О химическом составе петрографических формаций России. Изв. Геол. Ком., 1923, стр 87.
35. S. Tomkeieff. A contribution to the petrology of the Whin Sill. Min. Mag., 1929, XXII, 100.
36. C. Fenner. The Katmai magmatic province. J. of G., 1926, 34, XXXIX, 673.
37. F. Loewinson-Lessing. The problem of the anorthosites and other monomineralic rocks. J. of Geol., 1923.
38. Д. С. Белянкин. Граниты Олонцкого края. В сборнике „Каменные строительные материалы“, вып. 2, 1923.
- 38a. Д. Белянкин и А. Турцев. К изучению гранито-диабазовых контактов на восточном побережье и на островах Онежского озера. Изв. Ленингр. политех. инст., 29, 1925, 215.
- ✓ 39. А. Полканов. О контактном взаимодействии диабазов с гнейсо-гранитом на Кольском полуострове. Тр. СПб. общ. еств., 44, вып. 1, 1913, 155.
40. A. Laitakari. Palingenese am Kontakt des postjotnischen Olivin-diabases. Fennia, № 35, 1928.
41. T. Barth. Die Pegmatitgänge der kaledonischen Intrusivgesteine im Seilandgebiete. Skrifter utgitt av det Norsk Vidensk. Akad. i Oslo, 1927, № 8,
42. R. Colony. Bull. New York State Museum. 1923, 249. J. Kemp. Econ. Geol., 20, 1924, 716.
43. N. Sundius. On the differentiation of the alkalies in aplites and aplitic granites. Sver. Geol. Unders., № 336 (Arsbok för 1925), 1926.

44. Ф. Левинсон-Лессинг и Е. Н. Дьяконова-Савельева. Вулканическая группа Карадага в Крыму. Тр. Петрогр. инст., 1938.
45. H. Cloos. Die Intrusionsfolge im Bayrischen Wald. Geol. Rundsch., XIV, 1923.
46. A. Holmes and H. Harwood. The tholeite dikes of the North of England. Min. Mag., 1929, 22, I.
47. A. Holmes. The origin of igneous rocks. Science Progress, 1915, 67—73.
48. Ф. Левинсон-Лессинг. К вопросу о генезисе изверженных пород. Тр. Минер. музея, 1929.
49. Ф. Левинсон-Лессинг. Петрография. 3 изд., 1938.
50. *Compte Rendu de la Réunion Internationale pour l'étude du précambrien et des vieilles chaînes des montagnes en Finlande (1931)*, 1933.
51. L. Fermor. Preliminary note on garnet as a geological barometer and on an infraplutonic zone in the earth's crust. Records of the Geological Survey of India, 1913, XLIII, 41.
52. L. Fermor. The relationship of isostasy, earthquakes and vulcanicity to the earth's infraplutonic shell. Geol. Mag., 1914, 65.
53. E. Reyer. Beitrag zur Physik der Eruptionen und der Eruptivgesteine. 1877.
- ✓ 54. Ф. Левинсон-Лессинг. Сферолитовые породы Мугаджарских гор. Тр. СПб. общ. еств., 1905, 131.
- ✓ 55. Ф. Левинсон-Лессинг. О своеобразном типе дифференциации в вариолитах Ялгубы. Тр. Петрогр. инст., 5, 1934. (Печатается).
56. Д. С. Белякин. О сферолитах в техническом стекле и о некоторых шаровых образованиях в магматических горных породах. Тр. Петрогр. инст., вып. 4, 1933, 17.
57. H. Washington. The chemical composition of the earth. Am. J. of Sc., 1925, 351.
- ✓ 58. А. Н. Алешков. Дунито-перидотитовые массивы Полярного Урала. Изд. АН, 1929.
59. P. Geijer. The iron ores of the Kiruna type. Sver. geol. Unders., 1931, Ser. C, № 367.
60. P. J. Holmquist. Om pegmatit palingenes och ptygmatisk veckuing.
61. A. Lawson. Rainy Lake District. Ann. Rep. Geol. Surv., Canada, 1887, Part F.
62. R. Daly. Igneous rocks and the depths of the earth. 1933.
63. G. Beskow. Södra Storfjället im südlichen Lappland. Eine petrographische und geologische Studie im zentralen Teil des Skandinavischen Blokgebirges. Årsbok, 21 (№ 5), Ser. C, № 350 (Sveriges geologiska undersökning, 1929).
64. B. Asklund. Petrological studies in the neighbourhood of Stavsjö at Kalmarden. Sver. Geol. Unders., Ser. C, № 325. 1925.
65. J. Barrell. Geology of the Marysville Mining District. A study of igneous intrusion and contact metamorphism. U. S. Geol. Surv. Prof. Prop., № 57, 1907.
66. R. Daly. Sills and laccoliths illustrating petrogenesis. *Compte rendu Congr. Géol. Intern. Canada, 1914 (1913)*, 189.

67. B. Åsklund. Granites and associated basic rocks of the Stavsjö area. Sver. Geol. Unders. Årsbok, 27 (1923), № 6, 106.
68. N. Bowen. The origin of ultrabasic and related rocks. Am. J., XIX, 1927, 89.
69. W. J. Mead. The geologic role of dilatancy. J. of G., 1925, 685.
70. N. Bowen. The evolution of the igneous rocks. 1928.
71. Ф. Левинсон-Лессинг. Об основных проблемах петрогенезиса. Изв. СПб. Полит. инст., 1910.
Ha. F. Loewinson-Lessing. The fundamental problems of petrogenesis. Geol. Mag., VIII, 1911.
72. R. Daly. Proc. Amer. Phil. Soc., 64, 1925, 283.
73. P. Eskola. On the differential anatexis of rocks. Comptes Rendus de la Soc. Géol. de Finland, № 7, 1933, 18.
74. A. Holmes. Geol. Mag., 64, 1927, 266.
75. J. H. Vogt. Journal of Geol., 30, 1922, 672.
76. I. W. Greig. Immiscibility in silicate melts. Am. J., 13, 1927, 1—44, 133—154 (см. также 1928, 175).
- 76 a. I. W. Greig. On liquid immiscibility in the system $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. — Am. J. 1927, 473.
77. W. Hobbs. Variations on composition of pelitic sediments in relation to magmatic differentiation. C. R. Congr. Géol., Canada, 1914, 241.
78. F. Grout. Movements in crystallising magma. J. of G., XXVIII, 1920, 255.
79. G. Bain. Amount of assimilation by the Sudbury norite sheet. J. of Geol., XXXIII, 1925, 509.
80. T. Phemister. A criticism of the application of the theory of assimilation to the Sudbury sheet. Ibid., 819.
81. N. Bowen. The amount of assimilation by the Sudbury norite sheet. Ibid., 825.
82. E. Reuning. Verbandverhältnisse und Chemismus der Gesteine des „Bushveld Igneous Complex“ Transvaal und das Problem seiner Entstehung. N. J. B., Bd. 57, A, 1927, 631.
83. F. Grout. A type of igneous differentiation J. of G., 25, 1918, 626.
- ✓ 84. Б. Кротов. Геологические исследования в Алапаевском округе на Урале. Изв. Геол. Ком., 1929, XLVIII, № 2.
85. T. Phemister. Igneous rocks of Sudbury and their relation to the ore deposits. 34-th Ann. Rep. of the Ontario Dep. of Mines., XXXIV, (1925) 1926, VIII.
86. E. Baily, H. Thomas и др. Tertiary and post-tertiary geology of Mull. Mem. Geol. Survey of Scotland, 1924.
87. H. Read. The two magmas of Strathbogie and Lower Banffshire. Geol. Mag., 1919, 364.
88. N. Bowen. The later stages of the evolution of igneous rocks. J. of G., 1915.
89. J. Sederholm. On orbicular granites, spotted and nodular granites etc. and on the rapakivi structure. Bull. Com. Géol. de Finlande, 1928, № 83, 39—45.

90. K. v. Chrustschoff. Ueber holokrystalline variolitische Gesteine. Mém. Acad. d. Sc. (VII Sér.), XLII, № 3, 1894.
91. F. Loewinson-Lessing and O. Vorobiev. Contribution to the Knowledge of orbicular structures in igneous rocks. C. R. Acad. des Sc., 1929, 351.
92. M. Schweig. Untersuchungen über die Differentiation des Magmas. 1903, 516.
93. J. Vogt. What may we learn from Brögger's essexitic Harum volcano concerning the magmatic differentiation. Norsk. geol. Tidskr., XII, 1931, 541.
94. J. Flett. The Stankards Sill. Summary of progress of the Geol. Surv. for 1931, 2, 141 (Peop. N. J., 1933, 417).
95. M. Bertrand. Sur la distribution géographique des roches éruptives en Europe. Bull. Soc. Géol. de France, XIII (3 Sér.), 1887, 88, 573.
96. XVI International Geological Congress. Abstracts of papers, 1933.
97. А. Полканов. Об асимметричной диабазовой дайке. Тр. Ленингр. общ. ест., 1928, LVIII, вып. 4, 159.
98. F. Loewinson-Lessing. Studien über die Eruptivgesteine. C. R. Congr. Géol. St. Pétersbourg, 1897 (1894); см. также Ф. Левинсон-Лессинг. Исследования по теоретической петрографии (Тр. СПб. отд. ест., 1898).
99. W. C. Brögger. Das Ganggefolge des Laurdalits. 1898.
- ✓ 100. Д. С. Белянкин. О дифференциации магмы. Сборник научных работ, посвященный Левинсону-Лессингу. 1915.
101. Eilert. Das Ludwig-Soret'sche Phänomen. Z. anorg. Ch., 80, 1914, 1.
102. W. Lodochnikoff. On L. Bowen's paper: „Origin of the anorthosites“. J. of Geol., 1925, 33. См. также Геологич. Вестн., IV, 1918—21.
103. С. Жемчужный и П. Лебедев. Обзор работ по термическому и микроскопическому анализу силикатов и солей, произведенных в лабораториях минералогии и общей химии в 1906—1912 гг. Изв. СПб. Политехн. инст., XVIII, 1912, 223.
104. А. Чупров. Очерки по теории статистики. 1909.
- ✓ 105. Ф. Левинсон-Лессинг. О роли фантазии в научном творчестве (в Сборнике „Творчество“). 1921.
106. G. Tyrrel. The Geology of Arran. Mem. Geol. Surv. of Scotl., 1928.
107. Hall. The Bushveldt igneous complex. См. Guide-Book, Междунар. геол. конгресс в Ю. Африке. 1929.
108. Ch. Cardiner. The Loch Doon „Granite“ area Galloway. Q. J. of the Geol. Soc., 1932, I, London.
- ✓ 109. Ф. Левинсон-Лессинг. Несколько мыслей о дифференциации и о природе магмы. Изв. Петрогр. Политехн. инст., 1915, XXIII, 459. См. также Тр. Канадского Конгресса.
110. H. Wessels. Über Thermolyse. Das Ludwig-Soret'sche Phänomen in festen Körpern. Z. für phys. Chem., 1914, 215.
111. F. Grout. Petrography and Petrology. 1932.
112. F. Behrend und G. Berg. Chemische Geologie, 1927, 99.

115