

ПРОБЛЕМЫ  
ОБРАЗОВАНИЯ  
ГРАНИТОВ



*Сборник  
статей*

И \* Л

*Издательство  
иностранной  
литературы*

\*

552.322  
П-78

# ПРОБЛЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНИТОВ

СБОРНИК СТАТЕЙ

*Перевод под редакцией*

Б. М. КУПЛЕТСКОГО и А. П. ЛЕБЕДЕВА

*с предисловием*

А. П. ЛЕБЕДЕВА

61

1949

Издательство  
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
Москва



## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ПЕРЕВОДУ

Вопрос о происхождении гранитов принадлежал как в прошлом, так и теперь к числу труднейших и в то же время весьма важных в геологических науках, так как он имеет не только узко петрографическое значение, но тесно связан с целым комплексом вопросов в области геофизики, стратиграфии, тектоники, учения о метаморфизме и рудных месторождениях. Неудивительно поэтому, что в течение многих лет, начиная со времен Ляйеля и Хеттона, не прекращаются споры между сторонниками изверженного и метаморфического способов происхождения гранитов и родственных им пород. Эти споры в истории геологической науки периодически то затихают, то вспыхивают с новой силой, и именно с такого рода оживлением мы сталкиваемся в период, начиная с 30-х годов текущего столетия<sup>1</sup>.

Публикуемые статьи, появлявшиеся в журналах за период 1942—1947 гг., в известной мере являются обобщающими, так как наиболее крупные из них (Ниггли, Боуэн, Рид) подводят своего рода итог развитию зарубежных представлений за последние 10—15 лет в области вопросов, связанных с проблемами образования гранитов, отчасти также и других магматических горных пород (Боуэн). Авторы этих статей принадлежат к различным научным направлениям. Одно из них—это направление ортодоксальных магматистов; к наиболее типичным его представителям можно отнести Ниггли и Боуэна. У

<sup>1</sup> Подробный обзор литературы последних лет как советской, так и иностранной, по проблеме образования гранитов был сделан несколько лет назад Б. М. Куплетским („Обзор современных взглядов на происхождение гранитов“, *Изв. Акад. наук СССР, сер. геол.*, № 3, 1942). Концепции первой половины прошлого столетия рассматривались недавно П. И. Лебедевым („Вопросы химизма, связанные с происхождением гранитов“, Сборник, посвящ. Д. С. Белянкину, изд. АН СССР, 1946).

нас в Союзе эту точку зрения последовательно и независимо развивал Ф. Ю. Левинсон-Лессинг. Другое направление представлено сторонниками гипотезы гранитизации, объясняющей происхождение гранитов путем переплавления осадочных пород на глубине или путем пропитывания их особого рода эманациями, превращающими их в граниты; одним из наиболее крайних представителей этого направления можно считать Баклунда и более умеренными (из авторов настоящего сборника) — Рида и Рестолла. Между этими двумя крайними мнениями существуют, разумеется, и всякого рода промежуточные воззрения, сторонники которых в известной мере признают возможность как ортомагматического, так и метасоматического способа образования гранита. К числу последних принадлежит, пожалуй, подавляющее большинство исследователей, неизбежно сталкивающихся в процессе изучения гранитов с широким многообразием природных явлений.

Статья П. Ниггли «Проблема образования гранита» содержит детальное изложение последовательного развития взглядов на происхождение гранитов у петрографов, принадлежащих преимущественно к немецкой и швейцарской научным школам. Его статья дает подробный анализ высказывавшихся этими авторами точек зрения и резкую критику взглядов сторонников гранитизации. Ниггли справедливо упрекает наиболее крайних сторонников последней за то, что они «всячески оспаривают возможность перенесения лабораторных экспериментов на природные системы, в то время как для подтверждения своих собственных воззрений даже и не думают производить опыты». Действительно, отсутствие экспериментального подтверждения делает крайне шаткими многие из построений сторонников метасоматического способа образования гранита. Ниггли отмечает, что «ни петрохимия, ни учение о магматических провинциях не могут до сих пор дать аргументов в пользу литогенного происхождения гранитов; вся ответственность (за справедливость этих теорий.—А. Л.) ложится, таким образом, целиком на плечи геологов и тектонистов». Проводя последовательную точку зрения о магматическом происхождении гранитов, Ниггли

тем не менее предостерегает от слишком одностроннего понимания процессов магматической дифференциации, когда исследователь стремится объяснить все многообразие природных явлений, исходя из какого-нибудь одного единственного способа дифференциации. Он указывает, что надо остерегаться преувеличивать значение «единичного случая, с игнорированием имеющегося разнообразия». «Наблюдаемые вариации так велики... что совершенно недопустимо предполагать повсюду одинаковый состав исходной магмы». «Мы в деталях еще совершенно не знаем явлений кристаллизации, происходящих в магме». Следует указать и на справедливость высказываний Ниггли о несовершенстве и неточности крайне разнообразной существующей терминологии, в особенности в отношении таких, по-разному понимаемых различными авторами терминов, как «мигматит», «мигматизация», «гранитизация», «эруптивный» и т. п. (см. по этому поводу также примечание к стр. 147).

Несмотря на стремление объяснить происхождение гранитов и других изверженных пород исключительно процессами дифференциации магмы, Ниггли тем не менее вынужден признать существование «гранитизированных» метаморфических пород, которые надо отличать от гранитов. Не являясь сторонником явлений переплавления в большом масштабе, он принужден, однако, допускать его в более ограниченном размере. По его мнению, связь гранитов с гнейсами, образование магматитов, анатексис не дают разрешения гранитной проблемы в целом<sup>1</sup>. Эти несомненные явления, однако, «никак не объясняют всего многообразия гранитов на земле». Ниггли не видит никаких оснований для противопоставления древних гранитов молодым, как это делают Дели, Эскола и другие авторы, являясь таким образом сторонником приложения принципа актуализма для всех геологических эпох.

<sup>1</sup> Нужно отметить, что в своих позднейших работах (*Die leuko-granitischen und leukosyenitischen Magmen und die Anatexis, Schweizerische miner. und petr. Mitteilungen*, 26, 34, 1946). Ниггли уже допускает наряду с «магма-гранитами» в ограниченном масштабе возможность образования также и «мета-гранитов» и «мигматит-гранитов».

Ниггли, так же как и многие другие авторы печатающихся здесь статей, неоднократно подчеркивает характерный для петрологии современного периода возврат к старым взглядам и спорам, господствовавшим в вопросе о происхождении гранита 100—150 лет назад. Однако следует избегать чересчур механических аналогий в этом сопоставлении. В полемическом пылу Ниггли обвиняет авторов, пишущих по вопросам гранитизации, что «в их работах не приводится ни новых аргументов, ни более точных определений» по сравнению с тем, что содержалось в работах авторов первой половины XIX века. Трудно согласиться с этим положением, которое тем самым игнорирует весь огромный материал, накопленный наблюдателями в течение последних десятилетий, при изучении многих, совершенно неизвестных ранее, обширных пространств земной поверхности. Материал этот совершенно несравним по своим масштабам с тем крайне ограниченным кругом явлений, с которым имели дело исследователи прошлого и который по существу ограничивался небольшой частью Европы. Значительное расширение районов исследований, применение более совершенных методов и повышение степени детальности исследований неизбежно выдвигает новые задачи и дает в руки исследователей несравненно более богатые материалы, позволяющие по-новому подойти к освещению гранитной проблемы, хотя бы возраст последней и насчитывал уже свыше столетия. «Приверженность к старым необоснованным взглядам (имеется в виду наблюдаемый у современных авторов возврат, до некоторой степени, к идеям старой французской школы в вопросах гранитизации. — А. Л.) действует как тормоз, так как эти взгляды игнорируют некоторые новые направления в изучении тех или иных явлений». Однако этот упрек может быть направлен в равной или даже в большей мере против самого Ниггли, поскольку чересчур настойчивое стремление объяснить сложную проблему гранитов, исходя из чисто магматической позиции, неизбежно приводит его самого к отрицанию или игнорированию несомненно существующих фактов, свидетельствующих в пользу гранитизации.

Вслед за статьей Ниггли мы помещаем статью Н. Боуэна, которая хотя и не целиком посвящена проблеме гранитов, но представляет значительный интерес в том отношении, что дает законченное представление о позициях тех ортодоксальных магматистов, которые стоят на точке зрения существования единой базальтовой магмы и ставят вопрос о происхождении пород гранитного состава шире, чем он обычно ставится в более узко петрографических работах, приводя его в связь с широким кругом петрологических, геофизических и космогонических проблем. У Боуэна, пожалуй, еще в большей степени, чем у Ниггли, можно отметить склонность к частичному признанию процессов гранитизации, объяснение которым он ищет в существовании некоторого рода гранитизирующих эманаций, представляющих собой конденсированные кислые пары, берущие начало из магмы. Вместе с тем признание этих явлений, по его мнению, вовсе не ведет к «освобождению» гранитных пород от обязательного «родства» с основной магмой.

Статья Рида дает довольно полный обзор литературы о происхождении гранитов, начиная примерно с первых десятилетий XIX века. Особенно подробно рассматривает он работы по вопросам гранитизации французских авторов первой половины XIX века, затем литературу последних десятилетий, преимущественно фенноскандинавскую, в том числе о гранитах рапакиви. Подкрепляя изложение взглядов, развиваемых сторонниками гранитизации, данными своих собственных наблюдений и, зачастую, своеобразными и интересными умозаключениями, Рид приходит в итоге к выводу о широком значении процессов гранитизации, в особенности при образовании крупных гранитных массивов. Наиболее близка, по его мнению, к действительности схема, данная американцами Кеннеди и Андерсеном, о существовании двух типов магматических ассоциаций — вулканических, в формировании которых главную роль играли процессы кристаллизационной дифференциации, и плутонических, развитие которых было обусловлено, в основном, процессами гранитизации.

Приводя, в конце концов, свою классификацию горных пород, в которой последние делятся на три большие

группы — вулканическую, плутоническую и нептуническую, причем граниты вместе с метаморфическими породами попадают в группу пород плутонических, Рид заявляет о своем полном возвращении к взглядам Ляйеля. «Теперь мы полностью возвратились к Ляйелю», говорит он. Сомнительно, однако, чтобы это можно было рассматривать столь упрощенно. В истории наук нередко имел место в известной мере возврат к старым взглядам, но происходило это всякий раз на качественно новой основе, на базе непрерывно расширяющихся новых фактов и наблюдений, получающих свою интерпретацию с точки зрения точных наук — физики и химии. Здесь, таким образом, не может быть и речи о полном возврате к прошлому. Да и сама классификация горных пород, даваемая здесь Ридом, отнюдь не является простым повторением схемы Ляйеля, поскольку в нее Ридом введены и морфолого-генетические и петрографические признаки. Характерно, как мы видели, что та же мысль о «возврате к прошлому» мелькает и в статье Ниггли (см. выше). Это непонимание качественно иного содержания, вкладываемого в новые, внешне иногда сходные со старыми формы, является характерным для многих ученых запада, стоящих, как и большинство натуралистов, на стихийно-материалистических позициях, но не владеющих диалектическим методом мышления.

Наряду с чрезвычайно подробным изложением взглядов французских и скандинавских петрографов Рид, однако, обнаруживает крайне недостаточное знакомство с русской литературой как дореволюционного, так и современного периодов по вопросам происхождения гранитов. В статье Рида не находит своего отражения тот крупный вклад, который внесли в мировую науку работы советских петрографов по гранитоидным формациям различных районов СССР (работы Д. С. Белянкина, А. Н. Заварицкого, Б. М. Куплетского, П. И. Лебедева, Н. Г. Судовикова, Д. С. Коржинского, Ю. И. Половинкиной, П. Н. Кропоткина и целого ряда других авторов). Эта бросающаяся в глаза черта — нежелание ознакомиться с советской петрографической литературой — свойственна в той или иной степени и авторам других статей, публикуемых в настоящем сборнике.

Между тем советская литература по проблеме образования гранитов достаточно обширна. Отметим кратко хотя бы те некоторые работы советских ученых, которые непосредственно рассматривают наиболее интересующие Рига вопросы гранитизации. Так, А. А. Полканов детально описал явления, связанные с процессами мигматизации слюдяных гнейсов и амфиболитов и установил последовательные температурные стадии этого процесса. Н. Г. Судовиков детально описал явления гранитизации в докембрии Карелии, гранитные породы которого он рассматривает как определенные фации или группы фаций, выражающие определенную степень гранитизации пород древних комплексов. Процессы гранитизации в них выражаются, по его мнению, в сильном развитии кварцевого и полевошпатового метасоматоза. Ю. И. Половинкина детально описала явления гранитизации древних гнейсов Украинского кристаллического щита. Мигматизацию, по ее мнению, следует рассматривать не как процесс смешения исходных пород — гранитов и гнейсов, а как процесс, связанный с позднейшим появлением *in situ* некоторых участков мигматита. В работах Д. С. Коржинского мы находим также характеристику явлений гранитизации для пород Алданской кристаллической плиты, среди которых, по его мнению, следует различать, с одной стороны, мигматиты, образовавшиеся путем инъекции пород гранитами, с другой — гранитизированные породы. Процесс гранитизации, в его понимании, сопровождался выносом из гранитов летучих компонентов, кремнезема и щелочей, причем различная активность щелочей вызывала и различное течение процессов.

Таким образом, в работах советских исследователей вопросы гранитизации разрабатываются с большим успехом как в отношении детального минералого-петрографического изучения особенностей процесса, так и его физико-химической стороны, без тех крайностей в оценке роли процессов гранитизации при образовании гранитов, которые проявляются за последнее время в зарубежной петрографической литературе.

Помещенная далее статья Рестола посвящена обзору взглядов на происхождение гранитов, преимущественно

с точки зрения идеи о гранитизации. В значительной мере он основывается на обзоре, сделанном Ридом (см. выше), но несколько подробнее останавливается на некоторых аспектах проблемы, приводя свои собственные взгляды. Рестолл является противником универсального применения принципа актуализма, считая, что с ним «зашли слишком далеко» и что имеется, несомненно, коренное различие между гранитными породами архея и гранитами более поздних эпох. Рестолл более осторожно, по сравнению с другими сторонниками гранитизации, подходит к вопросу о первоисточнике гранитного материала в земной коре, справедливо указывая, что при решении вопроса о первоначальном родстве гранитов с основной магмой нужно различать вопрос об образовании гранитов из базальтовой магмы, при рассмотрении которого возникают непреодолимые затруднения с количеством необходимого основного материала, от вопроса об общем первоисточнике обеих магм. В целом Рестолл поддерживает взгляды Рида на преимущественно метасоматический способ образования крупных гранитных тел и констатирует, что интрузия гранитного материала в «чистом» виде возможна лишь в ограниченном масштабе и не может объяснить всей сложности наблюдаемых явлений.

Рестолл уделяет особое внимание крайне важному вопросу о связи гранитов с рудными компонентами, зачастую выпадающему из поля зрения авторов, пишущих о гранитизации; он приходит к выводу о крайне незакономерном, «спорадическом», по его выражению, характере связи металлогенеза с гранитообразованием.

Последняя из помещаемых в настоящем сборнике статей принадлежит одному из крайних сторонников идеи гранитизации — Баклунду, который в течение ряда лет с особым упорством защищает точку зрения о метасоматическом способе образования гранитов (сначала в отношении гранитов рапакиви и позже в отношении всех вообще гранитных пород). Баклунд справедливо считает необходимым детализировать самый механизм предполагаемого процесса метасоматического образования гранита. Однако, считая спорным и вообще несостоятельным применение методов физико-химического исследования,

которые он иронически называет «точными», к решению проблемы гранитизации, Баклунд не дает в этом отношении ничего взамен, кроме довольно неясных представлений о миграции ионов в твердом веществе по путям структурных нарушений, деформаций, совершающихся вследствие разности потенциалов кристаллической решетки.

Таким образом, собранные в настоящем сборнике статьи дают довольно разносторонний материал для характеристики современного состояния «гранитной проблемы» в зарубежной геологической науке. Нужно надеяться, что издание настоящего сборника окажется полезным в процессе дальнейшей разработки у нас в Союзе этой важной проблемы петрологии. Ознакомление геологов с той оживленной дискуссией, отражение которой мы находим на страницах работ, помещенных в сборнике, поможет критическому рассмотрению разногласий, существующих среди зарубежных ученых, и избежать тех или иных их ложных выводов из наблюдаемых природных явлений. Необходимость изучения вопросов образования гранитов диктуется не только чисто петрографическим значением этой проблемы, но и ее особой важностью для изучения законов распространения большого числа разнообразных рудных месторождений, так или иначе связанных в своем образовании с гранитами.

Достигнутый уровень советских петрографических работ показывает, что дальнейшее освещение проблемы образования гранитов требует усиления, во-первых, чисто геологической стороны исследований в смысле детального и целеустремленного изучения геолого-петрографических особенностей гранитных областей, во-вторых, изучения физико-химической стороны собственно магматических, метасоматических и метаморфических процессов, приводящих к образованию пород гранитной серии.

В заключение отметим, что подбор статей для настоящего сборника и первоначальное редактирование их переводов принадлежит профессору Б. М. Куплетскому, болезнь которого прервала его участие в подготовке сборника к печати.

*А. П. Лебедев*

ПРОБЛЕМА ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНИТОВ

P. NIGGLI

DAS PROBLEM DER GRANITBILDUNG

*Schweizerische mineralogische und petrographische  
Mitteilungen, 22, H. 1, 1—84, 1942*

При рассмотрении древнекристаллических пород, и в первую очередь вопроса об образовании гранита, мы затрагиваем проблему, которая привлекла к себе исключительное внимание, и вступаем в сферу, где еще не улеглась горячая, давно разгоревшаяся борьба мнений, и даже в ближайшем будущем нельзя надеяться на ее удовлетворяющее все стороны окончание. Гранит служит до некоторой степени представителем всей группы древних, кристаллически-зернистых невулканических пород; вокруг него преимущественно и ведутся все споры, исход которых в большей или меньшей мере является решающим и для других родственных образований.

При этом мы должны установить, какие причины привели к представлению о том, что по крайней мере большинство гранитов является первоначально изверженными породами, внедрившимися в пластичном состоянии. Исследование того, как возникло подобное состояние, составляет вторую, строго обособленную часть последующего изложения.

Взгляд, что гранит, в настоящем его виде, является морским осадком, уже давно не привлекает ничего внимания, однако целый ряд исследователей продолжает видеть в граните видоизмененную осадочную породу, продукт метаморфизма; неправдоподобность этой гипотезы для большинства детально исследованных гранитных образований должна быть показана путем беспристрастного рассмотрения всех обстоятельств.

F. Zirkel, Lehrbuch der Petrographie, II, 337—338, 1386, Bonn.

Лет 20—30 назад приведенная выше цитата имела только историческое значение. В настоящее время она вновь приобретает во всех своих деталях исключительную актуальность, причем несколько видоизменяется в противоположность более ранним взглядам; вспоминаются следующие стихи Гете:

Wie man die Könige verletzt,  
Wird der Granit auch abgesetzt  
Und Gneiss, der Sohn, wird zum Papa  
Auch dessen Untergang ist nah<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Как низвергают королей,  
Развенчан будет и гранит,  
И близок будет к гибели своей  
Тогда и гнейс — гранита сын.

В конце прошлого столетия, казалось, осуществилось то, о чем мечтал Х. Фогельзанг в своей «Философии геологии», 1867 г.: «окончательное исчезновение так называемой универсальной теории». Изыскивали различные, подкрепленные результатами наблюдения, теории образования пород, которые соответственно употреблялись только для определенной области, выделяли осадочные породы наряду с изверженными и метаморфическими, центр тяжести усматривался во взаимодействии между различными условиями образования. Развивались теории пневматолитического, гидротермального и термального контактового метаморфизма, явлений ассимиляции, магматической дифференциации и дислокационного метаморфизма. Искали связи между образованием пород и рудных месторождений и пытались воссоздать прежде всего петрогенезис не только путем полевых геологических и микроскопических наблюдений, но и путем физико-химических исследований. Задачей будущего являлось дальнейшее развитие, связанное с уточнением границ, с заменой неопределенных выражений точным определением понятий. Обилие новых наблюдений позволяло надеяться на возможность синтезов, которые представят в истинном свете ряд закономерностей общего порядка, без употребления необоснованных обобщений.

Отказ от универсальной теории неизбежно повел к развитию систематики. Необходимость принимать во внимание генетическое разнообразие пород, а также решение вопроса о распределении различных типов пород, часто требовались в интересах картографии и педагогики; хотя окончательные заключения по некоторым деталям и не могли быть даны. Явления обратимости (конвергенции), хорошо известные всем полевым петрографам, к тому же нередко неправильно истолковывались геологами; или возникали ничем не оправданные упрощения, обусловленные примитивностью схемы классификации. Возникшие в силу этого неясности должны были подготовить новую эпоху; ее уже, повидимому, предвидел Х. Фогельзанг, когда в 1867 г. писал (см. цит. работу, стр. 214):

«Кажется подрыв универсальной теории дал повод некоторым геологам углубиться с известным дилетантским рвением в отдельные острые вопросы современности, решение которых, казалось, не представляло большой трудности; однако, подвергаясь здоровой критической переработке, эти вопросы вскоре теряли ясность своей постановки и не могли более служить геологу для достижения своей строго ограниченной цели».

Около 15 лет назад<sup>1</sup> в геологии обозначился период, замечательный в том отношении, что он характеризуется возвратом к взглядам, которые господствовали в борьбе мнений 100—150 лет назад. Это ни в коей мере не наносит ущерба ценности этих теорий. Нередко в ходе развития науки, на основе новых взглядов и более точных формулировок, случается возврат к старым теориям,

<sup>1</sup> Статья опубликована в 1942 г. (Прим. ред.)

с которыми уже казалось все давно покончено. Замечательно, что изучение старой литературы показывает, что сейчас не приводится ни новых аргументов, ни более точных определений. Напротив, довольно часто более ранние противоречия во взглядах настолько остро освещают действительное положение вещей, что становится вполне целесообразным вспомнить о прошлых эпохах. В этом возврате к устаревшим взглядам, которые почти не упоминаются в новых учебниках, имеется существенный смысл и в другом — иногда старые взгляды ошибочно выдаются в качестве новых мнений.

Наука должна всегда заниматься основными вопросами: она должна проверять извлекаемые из глубины веков старые представления, уточнять границы понятий, стараясь избежать одностороннего уклона в пользу примитивных воззрений.

Не случайным совпадением является то, что вопрос об *образовании гранитов* стоит в центре новых дискуссий:

61 «Нет ни одного эксперимента, который мог бы решить вопрос, как возникают кварц, полевой шпат или слюда, и еще меньше таких, которые являлись бы ключом к решению вопроса об образовании гранита и гнейса. . . Здесь нам ничто не может помочь, кроме тщательного исследования форм проявления, общности, условий залегания, короче говоря, тех геогностических условий, среди которых мы встречаем в природе материю, массу» (Х. Ф о г е л ь з а н г, «Философия геологии», Бонн, 1867, стр. 210). И дальше (там же): «Решение задач теоретической геологии, поскольку речь идет об образовании материи, должно основываться на сравнении геогностических анализов с результатами синтетических опытов физики и химии».

Особые трудности возникают, если заниматься таким вопросом, как образование гранита, вследствие наличия ряда проблем, характеризующихся противопоставлениями таких понятий, как *нептунизм — плутонизм, метаморфизм — магматизм, идиогенезис — дифференциация, тектоника коры — тектоника магмы*. Аргументы, которые принимаются во внимание при обсуждении какого-либо вопроса, нередко, без видимой внутренней связи, используются противоположной стороной. Несмотря на это, мы попытаемся хотя бы в общих чертах расчленив эту постановку вопроса на отдельные проблемы, как это было указано выше.

## НЕПТУНИЗМ — ПЛУТОНИЗМ

Против взгляда, что гнейс и гранит представляют механические осадки (теперь мы бы сказали «аркозы»), резко выступил Г. де-Соссюр, который уже в 1776 г. описал гранитные жилы из окрестностей Лиона: «Частицы кварца, шерла и полевого шпата, растворенные в однородном флюиде, выделились затем в виде смеси; это напоминает то, что мы наблюдаем при образовании правильных и неправильных кристаллов, образующихся на дне какого-либо сосуда из насыщенного водного раствора этих солей».

Это было до того, как Дж. Хеттон и Дж. Плейфер (1788, 1795, 1802), а также Дж. Мак-Куллох (1814, 1819) обратили внимание на бесспорный факт эруптивного, рвущего залегания многих гранитов. Спор о том, является ли гранит своего рода химическим осадком (имеющим гидатогенное происхождение и отложившимся частично, возможно, вместе с гнейсом в первобытном море), или имеет «огненно-жидкое» (пирогенное) происхождение, однако, продолжался<sup>1</sup>. Целесообразно вспомнить о некоторых аргументах, которые полностью потеряли всю свою силу, но, к удивлению, вновь воскресли уже в несколько измененном виде.

а) *Вулканическая деятельность*, которая дает непосредственное доказательство факта существования расплавов в глубине земли, *истолковывалась ранее, как явление подчиненное, ограниченное в своем проявлении небольшим рядом мест.*

Стать на эту точку зрения — значит отречься от всех достижений исторической геологии. Так, Р. А. Дэли опубликовал в 1933 г. следующие замечательные цифры: из 158 590 кв. км Североамериканских Кордильер, покрытых геологической съемкой, 24918,4 кв. км падает на долю типичных вулканических пород. (В то время, как по другим данным в той же области находится 13531,22 кв. км интрузивных глубинных пород и 738,4 кв. км интрузивных гипабиссальных пород.)

<sup>1</sup> Ж. Ф. д'Обюиссон де Буазен в своей „Geognosie“ (немецкий перевод 1821—1822 гг.) полностью принимает точку зрения Вернера, хотя он в то же время указывает на существование гранитных жил.

Каким «оригинальным» кажется поэтому взгляд Ван-Беммелена, высказанный им в 1938 г., что образование магмы есть явление местное (происходящее в отдельных магматических камерах).

Даже если мы будем рассматривать только такие породы, которые по аналогии, несомненно, возникли из лав как вулканические образования или излившиеся породы, то отсюда мы неизбежно придем к выводу о «*вездесущности*» магмы.

Факт поднятия расплавов мы констатируем не только для *до-, син- и посторогенного магматизма* всех складчатых гор, собственно в их краевых зонах, но и в областях кратогенов, связанных с разломами. Каждая теория, которая предполагает местное или проявляющееся только в особых случаях магмообразование, состоит в неразрешимом противоречии со всем комплексом геологических фактов. В этом отношении не может быть возврата назад.

б) *Образование кварца*, совершенно чуждое, как раньше считали, вулканическим породам, так же как и *последовательность выделения составных частей гранита*, не стоящее в прямой связи с убыванием температур плавления отдельных минералов, казалось говорило против магматического или, как тогда называли, пирогенного происхождения гранита. Не кто иной, как Р. Бунзен<sup>1</sup>, уже в 1861 г. указал на ошибочность подоб-

<sup>1</sup> R. Bunsen, Über die Bildung des Granits, *Zeitschrift der Deutschen geologischen Gesellschaft*, 13, 61, 1861. Цитируем: „Кварц застывает при более высокой температуре, чем ортоклаз, последний при более высокой температуре, чем слюда. Поэтому если гранит раньше состоял из огненно-жидкой смеси этих трех минералов, то должны— утверждают противники плутонического происхождения этого вида породы— при остывании затвердевать вначале кварц, затем полевой шпат и в конце слюда. Но так как петрографические структуры гранитных пород обычно позволяют установить иную последовательность затвердевания, то, утверждают они далее, эти породы не могут происходить из огненно-жидкой среды. На самом деле, трудно понять, как мог такой ошибочный взгляд годами удерживаться у геологов и еще труднее понять, почему он еще и сегодня приводится для аргументации геологических гипотез. Забывают о том, что температура, при которой тело застывает, никогда не является той же, при которой оно затвердевает, выделяясь *из своих растворов* в других телах. Точка затвердевания химически чистого соединения

ного рода заключений, а в настоящее время имеется тщательно разработанная физическая химия расплавов, которой нельзя пренебрегать.

Р. Ван-Беммелену<sup>1</sup> осталось только подхватить эти давно исчерпанные возражения, так как, приводя список «точек плавления минералов», он пишет: «Но с физико-химической точки зрения предположение, что из главных минералов породы остается дальше всех расплавленным именно минерал с наиболее высокой температурой плавления, кажется рискованным. Не логичнее ли предположить, что кварц биотитового гранита не имеет ничего общего с остаточным силикатным расплавом, и считать его выделившимся из водного раствора, содержащего кварц?»

Выдвинутое самим автором противопоставление расплава раствору указывает на то, что это давно изжитое противопоставление, к сожалению, вновь проявляется и в настоящее время даже в работах выдающихся петрографов.

Именно установление того факта, что жидкие магматические расплавы имеют «характер растворов» и сопровождаются воздействием содержащихся в них легко летучих веществ, таких, как вода, раз навсегда обострило спор между нептоунистами и плутонистами и, кроме того, установило тесную связь очень большого количества наблюдаемых фактов.

Уже Дж. Пулетт Скроп (1825), Ш. Брейслак (1822), Дж. Н. Фуке (1837) обратили внимание на возможность комбинации «огня» и «воды», а в 1847 г. Ф. Шерер<sup>2</sup> развил теорию гидатопирогенного происхождения глубинных пород, а Ф. Циркель написал в своем «Учебнике петрографии», тт. I—II (Бонн, 1866): «В последнее время все более распространенным становится мнение, что эруптивная магма гранита не имеет чисто пирогенного происхождения. Как уже было сказано при упоминании о наблюдениях Сорби (1858), принимая во внимание все вышеприведенные условия, характеризующие состояние гранита при его внедрении, рассматривают последний как жидкий расплав, обогащенный парами и значительно насыщенный водой, или, по выражению Сорби, как «комбинацию изверженного расплава, водного раствора и газового возгона».

зависит только от природы вещества и давления. Напротив того, точка затвердевания вещества, находящегося в растворе совместно с другим, определяется кроме того, и главным образом, относительными количествами содержащихся в этом растворе веществ».

<sup>1</sup> R. van Bemmelén, On the origin of some granites from Singapore, 31.

<sup>2</sup> Интересным является спор между Шерером и Дюроше (Bull. de la Soc. géol. de la France, 1847—1850).

Уточнение связи этих явлений, необходимое для выяснения понятия «насыщенная газами магма», было за последние 30 лет предметом экспериментов и теоретических исследований.

в) К началу спора между непунистами и плутонистами типично вулканическими образованиями считались только базальты. *В настоящее время известно, что часто встречаются лавы гранитного состава, что застывают они нередко в виде стекла, давая таким образом доказательство первоначально жидкого состояния.*

Из 24918,4 кв. км эффузивных пород, которые приводит Р. А. Дэли для Тихоокеанских Кордильер, на риолиты приходится 5578,8 кв. км и на дациты 213,46 кв. км, т. е. более чем  $\frac{1}{3}$  всей массы эффузивных пород произошла из магм, явно пересыщенных  $\text{SiO}_2$ . В настоящее время не вызывает никакого сомнения, что из глубины земли поднимаются магмы гранитного состава и *необходимо только проследить, что происходило, если эти жидкие расплавы кристаллизовались до излияния.* До сих пор нет теории образования гранита, соответствующей этой постановке вопроса. Кроме того, во многих местах вскрываются благодаря эрозии переходы от вулканических образований к затвердевшим под корой массам, так что непосредственно наблюдаются и смены структур.

Сейчас все более становится ясным, что возникновение так называемой гранитной структуры глубинных пород вовсе не требует больших мощностей покровных образований.

г) С самого начала гранитная проблема была усложнена фактом *совместного нахождения гранита и гнейса.* Достаточно привести несколько цитат. Ф. Циркель пишет («Учебник петрографии», т. II, стр. 358): «В то время как все эти явления и отношения служат свидетелями эруптивного происхождения тех гранитных масс, в которых обнаруживаются эти явления, нельзя забывать, что наряду с ними имеются и такие граниты, которые сами по себе не обнаруживают *никакого эруптивного залегания* или переходов к нему; именно к этой группе относятся те граниты, которые находятся в тесном переслаивании с определенными гнейсовыми отложениями и, будучи связаны с последними также и петрографиче-

скими переходами, кажется входят как полноправные члены в состав таких отложений». К. Ф. Науман («Учебник геогнозии», т. II, Лейпциг, 1862) говорит следующее: «Гранит действительно представляет породу, которая во многих областях выступает как член древних формаций и которая оказывается настолько тесно связанной с первозданными гнейсами рядом петрографических переходов и переслаиванием с ними, что разделение обеих пород становится почти невозможным».

Однако ни один из этих великих петрографов не оспаривал магматического происхождения гранита, так же как и И. И. Седергольм, которому мы обязаны рядом важных работ в отношении связи гранитов и гнейсов и которого так часто цитируют в противоречии с его же собственными взглядами.

В заключительной работе<sup>1</sup> мы находим, например, следующие места: «Во время интрузии постботнийских гранитов древние породы были в значительной степени брекчированы и граниты интрузированы между их обломками, образуя разнообразные мигматиты. На больших участках Фенноскандии мигматиты возникли в эпоху интрузий» (стр. 13). Далее: «Породы Лапландии обычно богаты гранатом и, очевидно, образовались в период сильных тектонических движений, когда гранитная магма была одновременно интрузирована в древние граниты, гнейсы, метабазиты, анортозиты и осадочные слои» (стр. 13). На стр. 22 этой же работы находим: «Все супракрустальные формации, описанные выше, начиная со свионийских и кончая ятулийскими, имеют ту общую особенность, что во многих местах они сильно метаморфизованы и пересечены жилами гранита; то, что эти жилы действительно в большинстве случаев являются гранитной интрузией, а не образованы при «ультраметаморфическом» изменении некоторых осадочных пластов, доказывается фактом их тесной связи с гранитами, встречающимися в больших массах, возраст которых хорошо определим. Иногда эти гранитные жилы так тесно интрузируют древние супракрустальные породы, а также граниты субстрата и обе части при этом настолько сильно проникают друг в друга, что только при очень тщательном изучении удастся установить характер компонентов. Это тесное взаимное проникновение значительно менее очевидно в более молодых формациях. В последних на обширных площадях более четко выражены стратиграфические, тектонические и петрологические соотношения. Разница происходит исключительно

<sup>1</sup> On the Geology of Fennoscandia with special reference to the Pre-Cambrian, *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande*, N. 98, 1932.

из того, что поверхностные надкоровые породы древних циклов удалены эрозией на значительно большую глубину и в этом случае быстрее подвергались метаморфическим процессам. Невозможно установить определенную разницу в первичном характере пород, которая показала бы последовательные изменения петрогенетических условий древнего и позднейшего времени».

Или на стр. 25: «Граниты рапакиви затвердели под покровом древних пород в виде лакколитоподобных пластов, а в некоторых местах в виде эффузивных слоев, залегающих на древних осадках и вулканических образованиях».

Из приведенных цитат видно, что этот лучший знаток докембрийских пород Европы, автор понятия «*мигматит*», рассматривал интрузию гранитной магмы, как основное явление. Современные крайние мигматисты, постоянно ссылающиеся на работы Седергольма, отстаивают взгляды, не имеющие ничего общего со взглядами этого крупного финского исследователя.

Тем самым старей спор между непутони́змом и плуто́низмом был разрешен на основании наблюдений и теоретических рассуждений, справедливых также и в настоящее время. Частично произошел синтез теорий (гидато́пирогенез), частично получены новые данные в пользу эруптивной деятельности, которые не могут быть опровергнуты никакими новыми наблюдениями.

Однако несмотря на то, что взгляд на граниты как на химический осадок должен быть отвергнут и в настоящее время серьезно никем не отстаивается, учению о магматическом происхождении пород с начала и особенно с середины XIX столетия противопоставляется новая гипотеза — гипотеза образования путем *метаморфизма*.

Все заслуживающие внимания попытки толкования способа возникновения гранитных пород исходили уже свыше 100 лет назад из представлений о *гипогенном способе их образования* (т. е. возникновения их ниже земной поверхности или во внутренних частях земли). Еще Ч. Ляйель в 1830 г. разделил эти гипогенные процессы образования пород на вулканические, плутонические и метаморфические. Плутонический процесс означал возникновение из горячей, внедрявшейся снизу, но не достигавшей земной поверхности массы, вначале без уточнения состояния этой массы. Позднее массы, находящиеся в состоянии жидких расплавов, были названы магмами.

## МЕТАМОРФИЗМ И МАГМАТИЗМ

Вряд ли кто поверит, что представитель цюрихских петрографов склонен недооценивать значение метаморфизма пород в построении внутренних частей земли. Однако при чтении новых статей становится понятным, что осторожность в отношении к метаморфизму проявлялась уже около 100 лет назад; так, Эли де-Бомон употреблял выражение «гибкая теория метаморфизма», Ривьер — «услужливая теория», Г. де-ля-Беш — «шаткая гипотеза», а А. Эрдманн в 1844 г. вынужден был написать: «Метаморфизм неоспорим там, где он непосредственно наблюдается и может быть объяснен с физической точки зрения. Однако круг пород, где все эти условия могут быть выполнены, ограничен, и, следовательно, это ни в коей мере не подтверждает беспочвенные гипотезы в таком виде, как они выдвигаются теперь».

*Метаморфизм означает преобразование определенной, имевшейся уже заранее породы; однако с самого начала должны быть исключены крайние случаи его или же обозначены особо под именем ультраметаморфизма. В связи с этим необходимо напомнить, что именно теперь дискуссия о понятии «метаморфизм пород» затруднена благодаря расширению этого понятия. Если из изверженной породы путем выветривания, транспортировки и отложения возникает осадочная порода, то она является только осадочной породой и ни в коем случае не метаморфизованной изверженной породой. Если порода будет полностью расплавлена и образует позже на этом месте, или после некоторого перемещения образовавшегося расплава в пространстве, новую породу, то последняя, само собой разумеется, представляет магматическое образование; все же раньше думали, что лавы или магмы возникают только благодаря строго локальному расплавлению. В узком смысле слова термин метаморфизм (Хеттон, Буэ, Ляйель) отождествляли с понятием «изменение пород», и при этом возможности магматического или осадочного образования последних не принимались во внимание. В полном согласии с У. Грубенманом мы применяем термин метаморфизм только тогда, когда во время превращения породы,*

в каждый отрезок времени, порода как целое в основном характеризовалась твердым состоянием. Это, однако, не исключает давно известного воздействия мобильных фаз, как, например, газов, паров или растворов; последние на основании однозначных наблюдений вновь подчеркиваются почти всеми исследователями. Что метаморфизм подобного рода существует, доказывается наличием остатков реликтовых структур, сохранением общей текстуры (*Grossverbandes*) и особенно подтверждается микроскопическими исследованиями. Чисто теоретически можно представить себе такой случай (в противоположность простому спеканию), что *главная масса* породы сначала была жидкой и включала нерасплавленные реликты, а затем расплавленная часть, не испытав перемещения, застывала. Можно предвидеть, что часто будут возникать трудности при разграничении такого способа образования и образования путем затвердевания где-то возникшей магмы, которая принесла с собой глыбы или обломки пород (так называемые чуждые включения) или частично ассимилировала поверхность контакта. В таких случаях следует говорить, в противоположность нормальному метаморфизму, об *ультраметаморфизме*.

Однако вначале мы обсудим вопрос, имеются ли налицо такие признаки, которые позволили бы говорить о возникновении больших масс гранитных пород путем *нормального* метаморфизма других пород. Эти взгляды, высказанные почти 100 лет назад Б. М. Кейльгау, Ч. Кеферштейном, Г. \*Х. Фольгером, нашли теперь себе новых защитников. Б. М. Кейльгау в своей работе «Описание переходной формации в Норвегии» (Лейпциг, 1826) описал район Христиании (Осло), сделавшийся известным позднее благодаря работам В. Г. Бреггера и В. М. Гольдшмидта, как классический пример района с ясно выраженной магматической дифференциацией, контактовым метаморфизмом и магматическими пегматитовыми и рудными образованиями. Он описал контактные явления, которые он вначале истолковал так же, как Хеттон (вообще контактный метаморфизм). Позднее в статье «*Vorläufigen Wirt über Contactbildungen*», помещенной в 1828 г. в «*Annales der Physik und*

Chemie», он поставил вопрос, не могли ли уже механический контакт первоначально различных пород иметь подобные проявления благодаря реакциям, протекающим в твердом состоянии, без участия растворов или расплавов. «Имеется, таким образом, вероятность, что в затвердевшей части земли происходили и все еще происходят весьма существенные изменения вследствие подвижности частиц твердой массы».

Десятью годами позже, в 1837 и 1838 гг., Кейльгау высказал предположение, что многие кристаллические массы имеют не магматическое происхождение, а являются метаморфизованными осадками; гранит, например, возник из глинистого сланца, порфир—из песчаника.

Ч. Кеферштейн в своей капитальной работе «История и литература геогнозии» (Халле, 1840) следующим образом обобщает свои представления: «Весьма широко был распространен взгляд, рассматривающий гранит, порфир и базальт, как поднявшиеся снизу вулканические чуждые породы». С помощью фактов Кеферштейн попытался доказать, в противоположность этому взгляду, что эти породы под влиянием деятельности внутренних частей земли могли возникнуть благодаря преобразованию различных слоистых пород; некоторые граниты и порфиры Штейнмарка, Каринтии и т. д. образовались за счет сланцевых и переходных пород; их можно было бы назвать киласгранитами (Kilasgranite), красные порфиры Тироля и т. д. могли бы образоваться путем вторичного преобразования тамошних красных песчаников и называться поэтому мельспорфирами (Melsporphyr) и т. д., однако главная масса кристаллических пород в центральных Альпах, Зальцбурге, Тироле, Швейцарии и Савойе, слюдястые и тальковые сланцы, гнейс, гранит и т. д. возникли путем преобразования мергелистых и песчанистых пород, измененных в большей или меньшей степени, и поэтому могли бы быть названы флишевыми гранитами. На это указывают встречаемые повсюду недвусмысленные переходы, которые здесь не могут быть выведены из воздействия на боковые породы жидкого, поднимающегося снизу гранита. Большой частью рассматривают Альпы, как тесно

связанное целое, что может быть лучше всего объяснено, если рассматривать кристаллические массы как продукт преобразования осадочных пород, но тогда горы оказываются не древними, а молодыми образованиями».

Общим для всех этих взглядов является то, что гранит в контакте с гнейсом, сланцем или роговиком рассматривается как высоко специализированная форма метаморфизма; при этом, как часто и в новейших работах, упускается из вида то, что гранит обладает совершенно иным химическим составом, чем мергель, глина или известняк, следовательно, наверняка не мог возникнуть непосредственно из последних. Каждое серьезное учение, рассматривающее гранит и подобные породы как метаморфизованные осадки, должно привлечь на помощь *огромное перемещение вещества*. В известном смысле так поступил отличный знаток альпийского минерального жильного парагенезиса Г. Х. Фольгер. В своих работах<sup>1</sup> он пытался установить последовательность выделений и замещений (метасоматоз) в наблюдаемом парагенезисе трещин. Хотя это изучение происходило исключительно на объектах из коллекций Цюрихской минералогической выставки, этот, вообще очень осторожный, минералог частично перенес результаты своих исследований на возникновение пород, заключающих трещины. Ему недоставало петрографических знаний. Так, во второй работе, на стр. 12 находим следующий абзац: «Превращение известковистых осадков в полевошпатовые породы я смог доказать<sup>2</sup> минералогически на альпийских образцах так же, как это уже давно доказал *геологически* Штудер. Этот метасоматоз, эту замену полевым шпатом карбоната как чистое «замещение», мы не можем наблюдать; очень многое говорит за то, что здесь должны были исчезнуть кальциевые карбонаты и здесь дело идет не о незначительных количествах, а об огромных альпийских массах, не о революциях и катастрофах, связанных с провалами известковых и песчаных масс и их расплавлением во

<sup>1</sup> „Studien zur Entwicklungsgeschichte der Mineralien“, Zürich, 1854 и „Die Entwicklungsgeschichte der Mineralien der Talkglimmer-Familie und ihrer Verwandten“, Zürich, 1885.

<sup>2</sup> Описание замещения кальцита адуляром в друзе.

внутренних частях земли, а о спокойном развитии, сопровождавшемся химическими процессами, протекавшими очень медленно, атом за атомом; при этом тончайшие иголки рутила, оставаясь незатронутыми, переходили в новое состояние. Так как Альпы относятся к типу первозданных гор, то в этих областях должен быть замечен недостаток известковых осадков, широко распространенных в любой горной области; но, однако, они не являются формациями древних периодов, «бедных известью», а наоборот, это мощные триасовые, юрские и меловые известковые формации, путем превращения которых возникли «первозданные» породы Альп».

Фольгер представлял себе, что гранит, гнейс и слюдястый сланец образовались под влиянием широко распространенных процессов метасоматоза из древних осадков, вследствие воздействия водных растворов, так, что даже известняк мог превратиться в гранит.

Вначале посмотрим, как относились к этим гипотезам выдающиеся петрографы того времени, так как многое из того, что они приводили в своих возражениях, имеет силу и по сегодняшний день.

Принятие больших гранитных массивов за результат метаморфизма осадочных образований на месте противоречит факту равномерного строения гранита, отсутствию в нем какой-либо слоистости.

Еще в 1810 г. Леопольд фон-Бух писал: «Мы знаем гранит из различных мест земли, но всегда это *одна и та же* смесь, *одних и тех же* минералов. Почему всегда делается один и тот же выбор при столь большом разнообразии минеральных видов? Почему природа не создала в Китае породу из аксинита и эпидота, а в Саксонии из полевого шпата, кварца и слюды?»

Ф. Циркель пишет во II томе своего «Учебника петрографии» (стр. 344—348): «Именно гранит рассматривали как продукт превращения глинистого сланца и известняка. Кейльгау, начиная уже с 1825 г., во многих статьях пытался привести доказательства из наблюдавшихся им геогностических отношений в районе Христиании в пользу того, что гранит произошел из членов глинисто-сланцевой формации... Фольгер говорил именно о превращении известняков в граниты... Но

прежде всего следовало бы ожидать, что приверженцы теории происхождения гранита из глинистых сланцев, граувакков и известняков не забудут исследовать, действительно ли все граниты, встречаемые в природе, дают основание для подобных воззрений. Если бы действительно были найдены несомненные переходы от обломочных осадочных пород или известняков к гранитам, то и тогда вовсе не следовало бы, что здесь имеет место превращение первых во второе. Иногда гранит может служить источником материала для обломочных пород (как, например, при переходе порфиров в конгломераты и песчаники красного лежня), и при этом процессе естественно должен наблюдаться постоянный переход. Ниже будут подробно описаны воздействия, которые может вызвать в прилегающих породах при гранитной интрузии вода, обогащенная различными веществами; это выражается преимущественно в импрегнации боковых пород теми же минералами, из которых состоит сам гранит; при этом границы между породами стираются и устанавливаются постепенные переходы; в таких случаях глинистый сланец действительно местами превращается в гранит, однако только вследствие внедрения последнего. . .».

«Таким же преждевременным, как и вывод: так как в Зангерхаузене наблюдалось пирогенное образование полевого шпата, то полевой шпат может выкристаллизовываться в магме из огненной жидкости, будет и такой вывод: так как известно замещение полевого шпата, кварца и слюды другими минералами или новообразованиями водным путем, то и граниты могут быть продуктом превращения известняков или глинистых сланцев. . .».

«Наблюдая, как на протяжении многих километров гранитные обнажения не меняют своего петрографического облика, как они представляют всегда одну и ту же однообразную, равномерно-зернистую смесь полевого шпата, кварца и слюды, как с величайшим постоянством остается неизменным их химический состав и улавливаются лишь едва заметные отклонения в процентном содержании веществ, становится ясным, что эти породы обладали с самого начала одним и тем же химическим составом и что их петрографическое

образование должно было совершиться в один прием... Со сколь удивительной правильностью должны были бы происходить подобные изменения для того, чтобы нигде не уклониться от одного и того же количественного соотношения составных частей, как полно они должны были протекать, чтобы не оставить в граните ни следов углекислого кальция, ни признаков первоначальной обломочной породы, ибо никогда не было найдено ни малейшего следа окаменелостей; как рано, наконец, они должны были образоваться, так как уже самые древние осадочные пласты содержат обломки и гальку гранита».

Г. Ф. Науманн в своем «Учебнике геогнозии», т. II, стр. 154, после вступительных замечаний о способе образования гранитов, встречающихся в кристаллическом фундаменте (Grundgebirge) пишет:

«Если мы так же не в состоянии познать процесс их образования (подразумевается первично-магматическое происхождение гранитов кристаллического фундамента), то в этом отношении нам остается только утешиться вместе со сторонниками ультраметаморфизма, так как ничего лучшего не остается. В конце концов, пожалуй, все равно, какой процесс будет представляться нам загадочным — *преобразования* или *первичного* образования, но если когда-либо надо будет выбирать одну из этих двух загадок, то мы скорее склоняемся к принятию второй, так как она по крайней мере находится в согласии с действительной сущностью явлений». И на стр. 257: «Геотектонические условия залегания гранитов и сиенитов, к которым особенно относится их форма залегания, условия совместного нахождения, заключенные в них обломки, нарушения залегания вмещающих пород, все это неопровержимо доказывает, что материал обеих пород является эруптивным и был выжат в пластичном состоянии из неизвестных глубин земли».

Некоторые петрографы будут возражать, говоря, что эти ссылки на прошлое обладают скорее исторической ценностью, так как в настоящее время тот взгляд, что гранитные массивы представляют комплексы осадков, превращенные в граниты нормальным метаморфизмом (+ медленно протекавший метасоматизм), более не отстаивается. И все же это не так.

В одной из своих работ<sup>1</sup> Р. В. Ван-Беммелен выступает в защиту именно этого взгляда. Эта работа появи-

<sup>1</sup> On the origin of some granites from Singapoore, *De Ingenier in Nederlandsch Indie, Mynbanw en Geologie. Die Minjngenier*, 1940.

лась в 1940 г. Последнее следует особо упомянуть, так как автор из года в год изменял свои взгляды на происхождение гранитных пород.

Небольшая дискуссия могла бы показать, приводят ли новые наблюдения и гипотезы к повторению старых взглядов. Ван-Беммелен собрал образцы пород в двух каменоломнях (карьер Букит Тимах — Bukit Timah и карьер Мэндэй — Manday) крупного оловянного месторождения, приуроченного к глубинной интрузии Малайского полуострова, и задался вопросом: являются ли граниты и гранодиориты дуги Зунда продуктами фракционной кристаллизации магмы, или же они мигматитового происхождения (образовавшиеся трансформацией вещества *in situ* на месте ранее существовавшей твердой породы)... «Возможно, что по крайней мере часть так называемых «полнокристаллических изверженных пород» получает свой «изверженный вид» при перекристаллизации в *твердом состоянии* ранее существовавшего материала». В настоящее время развиваются теории, базирующиеся на воздействии эманаций, которые вызывают в твердых породах различные реакции и перекристаллизацию. «Особое значение этих теорий заключается в том, что они базируются на точном наблюдении как в поле, так и под микроскопом, в то время как теория дифференциации магмы при фракционной кристаллизации (предложенная Боуэном) основывается на комплексе гипотез о ходе кристаллизации силикатного расплава».

Уже одна эта фраза должна вызвать смущение, так как она предполагает читателя, полностью неспособного к критике. Как можно наблюдать в поле или под микроскопом проникновение эманаций? Что сложнее: недоказанное допущение проникающих растворов или паров неизвестного происхождения и состава и с неизвестным действием или представление о фракционной кристаллизации жидкого расплава? В свое время уже говорилось о наблюдениях, которые могли быть произведены только над конечными продуктами и все же переносились на весь процесс. Выражению «поднятие магмы» придают смысл как бы «*deux ex machina*», в то время как поднятие растворов или паров неизвестного происхождения и неопределенного состава рассматривается как нечто вполне естественное и само собой разумеющееся. Несмотря на это, поднятие гранитной магмы в некоторых вулканах является неоспоримым фактом наблюдения.

В карьере Букит-Тимах находят весьма однородные биотитовые граниты с местными структурными переходами в «порфиоровые» или «аплитовые». Ван-Беммелен забывает, что разнообразие структурных видов вполне может быть объяснено экспериментальным путем и удивляется этим структурным различиям. Он придерживается той точки зрения, что порфировая структура предполагает наличие разрывов в процессе остывания, но эта причина должна была бы тогда распространиться на всю область. Так как этого не наблюдается, то и гранит не может быть «продуктом застывания». Разбирать подобного рода примитивные представления не имеет смысла. Ван-Беммелену же они дают повод проверить, не позволяет ли «диффузионная теория» более просто объяснить эту структурную изменчивость.

Ван-Беммелен считает, что гранит должен был возникнуть путем

метаморфизма триасовых осадков. Конечно, следовало бы ожидать точного химического и микроскопического описания вмещающих осадочных пород, переходных образований и условий залегания, но ничего этого нет; кажется, что автор даже никогда не изучал и контактовой области, так как он пишет:

«Контакт между гранитами и осадками расположен на расстоянии полутора километров на запад от карьеров Букит Тимах и Мэндэй (согласно геологической карте Скривенора, 1924). Контактный метаморфизм превращает эти песчанистые сланцеватые глины в тонкозернистые роговики». Тем не менее предполагается, что порфиновые граниты развились благодаря собирательной кристаллизации из подобных роговиков, которые Ван-Беммеленом вообще не описаны. «В соответствии с той гипотезой, что среднезернистая гранитная текстура может образоваться при перекристаллизации и гомогенизации более мелкозернистой гранулитовой текстуры, *находящиеся в порфиновых выделениях перерожденные фенокристаллы моложе* основной массы». Если бы удалось это доказать, то метаморфический характер гранитов был бы более вероятен, чем магматическое их происхождение. Однако уже в основе этого вывода заложена ошибка, и вполне понятно, как это всегда подчеркивал Ф. Ринне, что собирательная кристаллизация может происходить и при магматическом затвердевании; кроме того, доказательство по аналогии с роговиками вообще не состоятельно; наблюдения, приведенные для доказательства последующего образования вкрапленников, совершенно не достаточны, отчасти даже противоречат гипотезе. Приложенные изображения шлифов показывают прекрасные корродированные, растрескавшиеся кварцы с углублениями, выполненными основной массой; по Ван-Беммелену, это, однако, остатки первоначальной зернистой структуры, а кварц представляет новообразование.

Каждый читатель этой работы сам найдет, что и из скудных микроскопических наблюдений совершенно без натяжки могут быть сделаны выводы, что здесь явления нормального магматического затвердевания (порфировидная структура). Фразы, вроде: «Как может свободный рост вкрапленников в расплавленной среде вызвать двойникование, замещение сложными двойниками вполне гомогенных кристаллов? Явлению сдвойникования кристаллов полевого шпата, кажется, более благоприятствует теория твердого состояния<sup>1</sup>, чем концепция расплава», показывают слабую аргументацию, особенно если вспомнить интенсивно сдвойникованные плагиоклазы несомненно метаморфических пород. Однако подобных интерпретаций немногочисленных шлифов оказывается достаточно для вывода, что гранит представляет метаморфическую породу. «Разновидность порфировидных гранитов можно рассматривать как определенную ступень процесса гранитизации при гомогенизации и перерождении мелкозернистой гранулитовой, роговиковой породы в среднезернистую гранитную породу. Обе разновидности гранита образованы при одних и тех же условиях давления и температуры, и их различие в структуре вызвано только крайней медленностью реакций в твердом состоянии».

<sup>1</sup> В момент образования. (Прим. перев.)

Еще менее убедительными являются рассуждения, которые выдвигаются в отношении менее однородных гранитов карьера Мэндэй, содержащих жилки аплита, гнезда пегматита и включения. Здесь кристаллизация из остаточного расплава противопоставляется кристаллизации из раствора и ставится вопрос: Почему кварц в одном случае представляет продукт кристаллизации из остаточного расплава, а в другом — отложение из раствора? Это похоже на вопрос, почему имеются горы, представляющие вулканы, и имеются горы, не являющиеся вулканами?!

Несомненно, Кейльгау, Кеферштейн и Фольгер приложили гораздо больше труда, чтобы сделать правдоподобными свои взгляды, чем это сделал в 1940 г. Ван-Беммелен. Оригинальным является и способ, которым он пользуется, цитируя других авторов для подкрепления своих положений; это относится, например, к высказываниям Ритзмана и Клооса:

«Согласно этим авторам *все* плутонические массы орогенических зон имеют мигматитовое образование. Это значит, что они образованы на месте благодаря трансформации (ультраметаморфизм) прежде существовавших твердых пород при добавлении материала из глубины (вследствие диффузии в газособразном или жидком состоянии) в комбинации с общим нагревом пород. Возможно, что такое повышение температуры может образовать местный палингенетический расплав гранитного состава» (называемый Рейнгардом «мигма»). Нельз. поверить, чтобы интрузивный, эруптивный характер таких гранитных пород толковался цитируемыми авторами, как «трансформация» *in situ*. Похоже на то, что Ван-Беммелен преклоняется перед «гипотезой цветной капусты» (cauliflower), согласно которой интрузивные отношения представляют лишь распространяющийся «наподобие цветной капусты» метасоматоз, что находится в полном противоречии с любым полевым наблюдением в горах с покровной структурой. Впрочем, естественно сейчас же возникают два вопроса:

1. Почему поднимаются «эманации» (это любимое выражение Холмса).

2. Какие причины всегда приводят к образованию гранодиорит-гранитового конечного продукта таким образом, что независимо от всего разнообразия осадков полностью исчезает первоначальная слоистость?

Мистикой отдает ответ<sup>1</sup> Ван-Беммелена: «Трансформация ранее существовавшей породы в гранит или «гранитизация» должна интерпретироваться, как текстурная и химическая *гомогенизация пород внешней оболочки земли*. Такого рода гомогенизация соответствует концепции о том, что каждый процесс в течение эволюции земной коры стремится к физико-химическому равновесию (называемому автором «*equilibrio-petal*» реакциями)... Граниты в настоящей стадии развития (охлаждения) нашей планеты, повидимому, представляют конечный стабильный тип пород среди остальных пород земной оболочки... химические и физические различия между плутоническими массами, повидимому, представляют последние следы различного состава прежде существовавших формаций пород, подвергнувшихся гранитизации».

---

<sup>1</sup> Несколько иначе выражается Х. Баклунд (Mitt. Naturf. Gesellschaft Schaffhausen, 13, 57, 1941): „Принимая во внимание преобладающее развитие гранито-гнейсов внутри центральных частей всех орогенов (ср. „центральная кристаллическая ось“ старого поколения геологов), гранитизация должна представлять своего рода конечный результат воздействия всех метасоматических явлений и вместе с тем представлять определенное физико-химическое равновесие“. И непосредственно вслед за этим заключение, выведенное из этой гипотезы, обращается уже в закон: „Попытки объяснения полевых наблюдений приводят к замечательному совпадению: конечный продукт полного метасоматоза (гнейс), для которого неизвестно место происхождения добавочного материала, показывает далеко идущее петрографическое сходство, да же почти полную идентичность с „магматической породой“<sup>66</sup>, генезис которой для нас не ясен (гранит)“. И поэтому гранит также является одной из разновидностей метасоматически измененных пород! При этом совсем нет указания на то, что гнейс, который к тому же часто обладает или нормально осадочным, или нормально гранитным составом, вообще получал привнос вещества при метаморфизме. В настоящее время немыслимо, чтобы петрограф из того обстоятельства, что кварц, полевой шпат и слюда, т. е. минералы, которые могут образоваться при различных условиях, встречаются в двух породах, вывел заключение, что и сами породы должны иметь *обязательно* одинаковое происхождение. Был период, когда это ложное заключение имело широкое распространение, но даже и с этой „универсальной теорией“ распрощались, как с недопустимым обобщением, благодаря физико-химическим исследованиям и полевым наблюдениям. В науке не всегда можно разбираться при помощи одних и тех же ошибочных выводов, если должна быть создана продуктивная работа.

Итак, вместо факта, что из внутренних частей земли прорываются основные (габброидные) до кислых (гранитные) расплавы (магмы), вместо убедительных, обоснованных физико-химических доказательств того, как они могут развиваться при известных обстоятельствах, выступает «гораздо более простая гипотеза»: имеется таинственная сила, которая заставляет подниматься пары и растворы из застывающей земли с целью преобразовать каждую породу, будь то известняк или песчаник, в гранит.

И в то время, как каждый петрограф стремится объяснить любую, менее значительную проблему путем многочисленных полевых наблюдений, изучением шлифов и химизма, автору вполне достаточно небольшого числа наблюдений для следующего заключения:

«Общий вывод из настоящей статьи таков, что современное (!) изучение петрологии плутонических масс гранита и связанных с ним пород в поле и под микроскопом устанавливает, что концепции мигматизации, гранитизации, диффузии, дифференциации и т. д. заслуживают внимания; другими словами, приводят к выводу о генезисе в твердом состоянии при диффузии эманаций. Изучение некоторых гранитов Сингапура, не претендующее ни в коем случае на исчерпывающую полноту, устанавливает все же бóльшую (!) ясность в этом направлении».

Идея Фольгера о вполне определенно протекающей истории развития минерального царства используется широко, однако без привлечения новых фактов, тщательных наблюдений или попыток теоретического ее обоснования. Явлений, говорящих в пользу эруптивности, отмеченных многочисленными наблюдениями еще со времени Мак-Кулоха, как будто не существует.

Прямой противоположностью работам Ван-Беммелена являются тщательные исследования Ф. И. Дрешер-Кадена<sup>1</sup>. По его работам, представляющим добросовестные наблюдения с превосходно изложенным и

<sup>1</sup> Beiträge zur Kenntnis der Migmatit- und Assimilationsbildungen, sowie der syntektischen Reaktionsformen; 1, 2, *Chemie der Erde*, 12, 14, 1939—40, 42.

иллюстрированным материалом, легко проверить, являются ли заключения автора убедительными. Во время печатания этой статьи появилась вторая работа<sup>1</sup>. В ней объясняется «образование письменного гранита в результате метасоматического растворения». Главным аргументом здесь служит отношение кварца письменного гранита к пертитовым включениям. Кварц должен быть более молодым, чем пертитовая смесь; часто еще более молодыми, чем кварц, являются процессы альбитизации. Снимки 39 и 40 (в статье Дрешер-Кадена. — *Прим. ред.*), несомненно, должны быть иначе истолкованы. Снимок 42 говорит скорее в пользу более старых предположений. Также и в отношении мирмекитовых образований Ф. Дрешер-Каден пытается дать новую интерпретацию<sup>2</sup>. В противоположность Ф. Бекке, по его мнению: «...наблюдения указывают на то, что вещество калиевого полевого шпата, как это соответствует нормальной последовательности образования различных кристаллов в гранитных породах, в подавляющем большинстве случаев моложе плагиоклаза... Кроме того, мирмекитизация ни в коем случае не представляет явления, наступающего только после завершения образования структуры. Образование мирмекита происходит, несомненно, ранее образования калиевого шпата и до выделения главной массы молодого кварца, который нередко выщелачивает мирмекитовые участки из плагиоклаза и внедряется сам». И в этом случае не все снимки говорят в пользу нового взгляда, так как остается неясным, почему во многих гранитных породах плагиоклаз замещается кварцем + калиевый полевой шпат.

Эти наблюдения показывают прежде всего, как многозначно могут быть истолкованы структурные картины. Только в редких случаях возможны обязательные заключения для всех исследователей. Почти всегда все интерпретации основываются, сознательно или бессознательно,

<sup>1</sup> Über die schriftgranitische Kristallisation und ihre Beziehung zur normalen Silikatmetasomatose granitischer Gesteine, *Chemie der Erde*, 14, 157—238, 1942.

<sup>2</sup> Über Schollenassimilation und Kristallisationsverlauf im Bergellergranit, *Chemie der Erde*, 12, 364—417, 1939—40.

знательно, на «особом подходе» и на оценке, которая исходит скорее из механически более простой возможности объяснения явлений, чем из сложной, так как первое предполагает индукцию и комплексный ход явлений кристаллизации. Тем не менее вполне понятно, что необходимо продолжать исследования в этой области с такой же тщательностью и со смелостью в синтезе наблюдений, как это делал Дрешер-Каден.

В отношении оценки вопроса об образовании гранита следует, однако, отметить два положения:

1. Гранофировое, *письменно-гранитное прораствание*, встречается особенно часто в несомненно излившихся породах и в трещинных жилах. Оно аналогично образованиям (с другими кристаллами), полученным экспериментально как продукт застывания расплавов. Поэтому не может быть никакого сомнения в том, что *письменно-гранитная структура*, каково бы ни было ее толкование в отдельных случаях, *остается в большинстве структурой магматического застывания*.

2. Повидимому, еще играют роль три предрассудка при использовании структурных особенностей для выяснения образования магматических пород.

а) Представление, что застывание расплавленной массы является единым, краткосрочным актом. Надо все более приучать себя к тому, что *именно при плутоническом образовании пород, совокупность процессов, приводящих к конечному продукту, который возможно определить минералогически и структурно, распределяется на промежуток времени, который подобен таковому при метаморфическом образовании пород в условиях ката- и мезозоны*. К этому присоединяется общая относительно высокая температура, пропитывание уже образовавшегося твердого вещества остаточными поровыми растворами, а позднее пневматолитовыми и гидротермальными растворами, что нередко приводит к *автометаморфизму или термическому преобразованию*. Вполне логичным является требование проверки подобных представлений экспериментальным путем в металлургии, в промежутки времени более короткие, чем геологические. В этом смысле вполне справедливо, что наука о магматических породах должна призывать на помощь

достижения науки о метаморфизме пород, так как в обоих случаях рассматриваются аналогичные процессы. Общее учение о структурах должно содержать в себе понятия, относящиеся ко всем трем классам пород. Однако недопустимо, чтобы из подобных аналогий делалось заключение о том, что вообще не существует магматических пород. Всегда надо помнить, что *вполне жидкие магматические массы, вылившиеся из внутренних частей земли, являются предметом непосредственного наблюдения, и что возникающие благодаря их затвердеванию породы обладают такой же структурой, как и породы, об образовании которых еще и сегодня ведутся споры.* Гранофировое прорастание и образование мирмекита встречается также в некоторых базальтах, которые не претерпели аллометаморфизма и которые, насколько мне известно, еще ни одним из современных исследователей не были обозначены как «немагматические».

б) Вопреки всем физико-химическим экспериментальным и теоретическим выводам кажется все еще продолжает господствовать мнение, что реакционные серии, перитектические превращения, резорбция и повторные выпадения, замещения, синантектические реакционные формы представляют нечто противоречащее нормальному. Это такое принципиальное, элементарное положение, что о нем не стоит постоянно напоминать. Подобные явления должны почти неизбежно встречаться именно в областях развития пегматитовых образований и позднейших стадий застывания гранита. Следует вспомнить о следующем выражении<sup>1</sup>:

«Теоретически возможно, что на границе пневматолитовых и гидротермальных растворов кривая растворимости идет, в общем, несколько в обратном направлении. Это значит, что при нормальном ходе охлаждения последующие стадии остаточных растворов имеют возможность растворять ранее выделившиеся минералы. Вполне понятно, что подобные реакции в сложных

---

<sup>1</sup> P. Niggli, Versuch einer natürlichen Klassifikation der im weiteren Sinne magmatischen Erzlagertstätten. Abhandlungen zur praktischen Geologie und Bergwirtschaftslehre, Halle, 1925.

системах, происходящие вследствие изменения химических отношений, должны иметь место также при высоком давлении (реакционный принцип). Явления растворимости общего значения выступают только при средних давлениях. Подобные явления резорбции хорошо известны в рудных жилах. Однако они часто также хорошо выражены и в пегматитах. Рис. 4 и 5 (в цитируемой работе. — *Прим. ред.*) показывают два шлифа пегматита (по Х. Зуттеру). Микроклины сильно резорбированы; при дальнейшем охлаждении отложилась смесь кварца и альбита (с подчиненным калиевым полевым шпатом). На рис. 5 отчетливо видно, как эти новообразования (альбит) могут выкристаллизовываться в виде друз в пустотах, возникающих благодаря резорбции».

Н. Л. Боуэн особенно настойчиво обращает внимание на реакционный принцип при нормальном застывании расплава, а при обсуждении происхождения эклогитов (П. Эскола) образование келифитовых оторочек часто рассматривается именно, как выражение позднематматических процессов.

Таким образом, мягко выражаясь, неверно, если в настоящее время явления *подобного рода, предсказанные учением об изверженных породах и выведенные из относящихся сюда физико-химических исследований, входят в литературу «как доказательства против магматического образования пород».*

в) В работах «гранитных метаморфистов» постоянно находим указание на то, что *физико-химические эксперименты* проводились всего-навсего над простыми, сухими расплавами и что ни в коем случае нельзя переносить полученные результаты на магмы, с их легко летучими составными частями. Почти 30 лет назад (пожалуй, одним из первых) я пережил эту дилемму, когда попытался привлечь для объяснения экспериментальные и теоретические доводы. В настоящее время для фантазии остается относительно мало места; на новые же привходящие эффекты можно не обращать внимания. Однако те, кто еще и теперь настолько преувеличивают естественные трудности экспериментов, что могут свести к безделице уже достигнутое, должны ясно понять, что

для подтверждения их взглядов еще не могут быть произведены опыты, хотя бы несколько адекватные природным явлениям. Легко обвинить противника в том, что у него отсутствуют точные экспериментальные доказательства, в то время как для подтверждения своих собственных взглядов даже и не думают производить опытов. Мы уже давно занимаемся в минералогической лаборатории Швейцарской высшей технической школы в Цюрихе опытами по расщеплению и перестройке кристаллов, хорошо понимая, что они имеют значение как для эруптивных, так и для метаморфических пород. Однако все до сих пор произведенные опыты показали, что для настоящего, псевдоморфозоподобного метасоматоза необходимо совместное воздействие целого ряда благоприятных факторов. Здесь мы имеем чрезвычайно сложный случай, который только в фантазии теоретиков кажется таким простым, что одна только вера в него уже может преподноситься как доказательство.

При чтении цитат бросается в глаза, что смешиваются такие понятия, как *мигматит*, *мигматизация*, *гранитизация*, несмотря на то, что по первоначальному своему значению они обозначают различные явления. Здесь скрыта большая опасность, так как на этой почве смешивались или даже привлекались для обоснования взглядов явления, которые хотя и не вызывают споров, однако находятся в принципиально другой плоскости. К сожалению, в этом смешении понятий виноваты сами исследователи, которые превосходные наблюдения А. Буэ, де Бомона, Ж. Фурне, И. И. Седергольма и т. д. переделывают в «универсальную теорию». Речь идет о сложном воздействии, которое оказывает магма и которое может привести к термическому, пневматоли-то-гидротермальному, контактовому метаморфизму, к инъекционному метаморфизму или даже к ассимиляции и переплавлению вмещающих пород. Наличие магм (и возникающих позднее из них магматических пород), являвшееся исходным пунктом рассуждения, рассматривалось как причина метаморфизма. Крайне спорным оставалось разграничение между метаморфическими и магматическими породами, степень загрязнения магмы благодаря ассимиляции, интенсивности воздействия

магмы или выделяющихся из магмы молекулярно-дисперсных фаз и вопрос о том, действительно ли надо принимать во внимание собственно расплавление.

А. Буэ, который в 1822 г.<sup>1</sup> впервые описал граниты и сиениты Германии, как магматические породы, уже в 1824 г. нарисовал следующую картину образования гнейсов и сланцев кристаллического фундамента: «Вулканическая теплота и газообразные эманации внутренности земли понемногу могли сообщить пластам, при большем или меньшем давлении, своего рода разжижение огненного происхождения... Элементы пластов при этом могли терять свои силы сцепления; составляющие их частицы могли быть разъединены одна от другой и газообразные эманации могли проникать в образующиеся при этом пустоты. Таким образом химическое средство могло проявляться в известных пределах, определяемых противоположными силами связи; частицы, составляющие породы, в зависимости от условий, возникающих во время разжижения или медленного охлаждения, могли приобретать более или менее кристаллическое расположение, не расстраивая или существенно не нарушая первоначальную листоватую структуру. Более того, воздействие химического средства, усиленное посторонними веществами, проникшими в эти породы благодаря возгону, могло породить всю массу разновидностей этих кристаллических минералов, рассеянных в гнездах, скоплениях и небольших жилах среди кристаллических сланцев».

Все разнообразие этих явлений было отлично представлено в середине XIX века Ж. Фурне, который был, пожалуй, одним из лучших исследователей, с многочисленными идеями, со способностью к обобщениям, однако не прибегавший к необоснованным спекуляциям. Одна из его важнейших работ посвящена Нижнему Валлису<sup>2</sup>. Она вышла в 1847 г., переведена на немецкий и издана с предисловием Б. Котта. В этом предисловии было написано: «Изверженные породы воздействуют соответственно их размерам, характеру их пути, их температуре на прорываемые ими толщи в зависимости от свойств, условий залегания и температуры последних. Огромные гранитные массы могут действовать аналогично раскаленному земному ядру, образовывать кристаллические сланцы или при проникновении через вышележащие толщи расплавлять их, доводя до эруптивного состояния. Менее значительные по размерам гранитные массы вызывают только образование роговиков,

<sup>1</sup> A. Boué, *Annales des sc. nat.*, 417, 1824.

<sup>2</sup> G. Fournet, *Die Metamorphose der Gesteine, nachgewiesen in den westlichen Alpen*, 1847.

узловатых сланцев и т. п. Чем больше разница температур между соприкасающимися породами, тем более ярко выступает воздействие на контактных поверхностях». . . . Что же касается настоящей статьи Фурне, то я не думаю, что где-либо можно найти еще такое детальное и научное описание изменений пород в крупном масштабе.

Фурне точно проследил изменение степени метаморфизма. Он пишет: «Соссюр к концу своей научной деятельности попытался обобщить свои исследования; он пришел к краткому выводу: «В Альпах нет ничего постоянного, кроме их разнообразия». Тогда считали, что он превратился в полнейшего скептика; ничего подобного, это суждение было скорей возражением против теории Вернера. Во время своих путешествий ему удалось более чем в двадцати пунктах собрать материал, красноречиво говорящий против общепринятых в то время взглядов; необычайная простота его теории делала ее доступной и понятной для людей самых обычных способностей и ее можно было использовать для геогностических построений в некоторых других районах; в Альпах же совершенно не существует подобной простоты. За это боролся Соссюр, и теория метаморфизма полностью поддерживала его в этом добром намерении. В последовательности слоистых пород, как это мы проследили в предыдущем изложении, замечаются совершенно незакономерные колебания между сильно метаморфизованными и оставшимися почти неизменными породами, и эти колебания увеличиваются, чем больше мы приближаемся к ядру плутонической деятельности».

В этой области Альп Фурне различал, как это принято и в настоящее время, следующие породы:

1. Изверженные.
2. Сильно измененные осадочные.
3. Незначительно измененные осадочные.

Он подробно рассматривает штокверки жил, описывает инъекционные породы, мраморизацию, образование антрацита, и несмотря на признание всего этого многообразия, все же слишком далеко заходит в своих обобщениях, так как какое бы то ни было тектоническое расчленение области отсутствует.

Именно при изучении таких старых работ превосходных наблюдателей и правильных интерпретаторов отдельных явлений нам становится понятной вся сомнительность попыток упрощенного толкования докембрийских пород, геологическая история которых может быть установлена лишь в крупных комплексах, которые в большинстве случаев вскрыты в двух измерениях.

Принципиально ошибочно полученные при этом результаты, основанные на недостоверных предположениях, пытаться перенести на покровные породы, гораздо лучше изученные в их образовании; с другой стороны, неправильно думать, что исследование глубинных формаций пород не может дать нам ничего нового.

Другие работы Фурне, относящиеся ко всей области магматического метаморфизма, уже обсуждались в исторической части книги автора «Die leichtflüchtigen Bestandteile im Magma».

Вызывают интерес две короткие заметки о классификациях пород, которыми пользовался Фурне, помещенные в *Jahrbuch für Mineralogie*, 1837 и 1838 гг. В томе за 1837 (стр. 522 и след.) Лортет упоминает «о геологических лекциях Фурне в Лионе». Различаются неизмененные осадочные породы (известняк, доломит, гипс, песок, глина, дресва, песчаники, конгломераты «пуддинговые камни», горючие породы), изверженные породы (кварцевые жилы, граниты, сиениты, порфиры, диориты, эвкриты, габбро, мелафиры, лерцолиты, вулканические породы, серпентины и т. д.) и метаморфические породы.

Последние могут быть или просто перекристаллизованы, вплоть до частичного переплавления, или сопровождаться привнесом или выносом вещества. Как примеры, указываются слюдяные модификации глинистого сланца: а) без фельдшпатизации (глинистый сланец, различные виды слюдяных сланцев, хиастолитовый сланец), б) с фельдшпатизацией (гнейсы, лептиниты, гранулиты). Наряду с этим выделяются как особые фации — роговообманковая кристаллизация, хлоритовая кристаллизация, тальковая кристаллизация, асбестовая кристаллизация и, наконец, добавлены «модификации, образовавшиеся при почти полном переплавлении сланцев». Аналогичным образом подразделяются метаморфические породы, происшедшие за счет песчаников, граувакков, известковых пород, доломитов. Это первая классификация, предшествующая той, которую позднее создал У. Грубенман.

Интересными являются появившиеся в 1838 г. в форме письма комментарии самого Ж. Фурне к этой систематике. В них указывается, что внешне сходные породы могут быть совершенно различного происхождения, так, например, ясно выраженные изверженные породы могут выступать в форме залежей. В первую очередь упоминаются гнейсы и диориты (по современной терминологии надо подразумевать амфиболиты). «Действительно имеются изверженные гнейсы, изверженные диориты, изверженные протогины, которые были

первоначально расплавлены и в таком состоянии поднялись из глубин земли. Но с другой стороны, имеются также измененные гнейсы, диориты, протогины: породы, которые были размягчены, которые могли быть более или менее полно расплавлены и, следовательно, должны нести в себе признаки происшедшего с ними». . . «как можно установить, является ли тот или другой гнейс, который мы находим в горах, расплавленной породой, или представляет фельдшпатизированный слюдистый сланец, перекристаллизованный из глинистого и т. п. Как правило, геологические условия облегчают установление подобных отношений».

Фурне, однако, надеется, что в будущем будет возможно более уверенное разграничение пород, на основе детальных исследований химических взаимоотношений минералов и пород. «Я указываю на эти обстоятельства, чтобы дать вам доказательство, что я никоим образом не нахожусь под вынужденным влиянием какой-то чрезвычайно преувеличенной теоретической идеи, но что я ищу истину, которую найду только посредством таких точных признаков, как упомянутые».

Вместе с этим, с одной стороны, остро поставлены проблемы орто-пара-гнейс, орто-пара-амфиболит, жидкий расплав и текучесть пород, с другой стороны, указывалось на то, что при высокой температуре метаморфизм может привести к переплавлению. Обращается также внимание на явления обратимости.

Укажем на «Gesteinsmetamorphose» (Berlin, 242—367, 1924), где подробно освещено, как могут наблюдаться пневматолитовый контактовый метаморфизм, гранитизация, инъекционный метаморфизм вплавления, контактовый метасоматизм, анатексис, образование мигматитов, палингенез и их воздействия.

Остается только добавить, почему за последние 15 лет смогла вновь развиться «универсальная теория», находящаяся в противоречии с этими воззрениями и ясными выводами И. И. Седергольма, которыми в конце концов настолько злоупотребляют, что накладывают штамп мигматитов на все разнообразие встречающихся гранитов и гнейсов.

Повидимому, имеются три главные причины:

1. Нежелательное расширение понятия *мигматит*.
2. Не поддающаяся контролю теория общего проникновения газами и эманациями.
3. Слишком сильное подчеркивание повторного расплавления частей твердой земной оболочки.

В этой главе мы разберем только первые два пункта.

1. В 1935 г. Г. Е. Вегман выступил с фундаментальной работой «Zur Deutung der Migmatite». (*Geologische Rundschau*). Он исходит из определения И. И. Седергольмом термина *мигматит* (смешанная порода), согласно

которому в нем следует различать две составные части, а именно:

- 1) субстрат или материнская порода;
- 2) добавленное вещество или привнос.

Несколько слабее подчеркнута другая точка зрения Седергольма — плутоническая (см., например, «On Migmatites and associated pre-cambrian rocks of southwestern Finland», *Bull. Comm. Géol. de Finlande*, № 77, Helsinki, 1926, особенно страницу 138 и уже ранее цитированные нами места, так же как и нижеследующая цитата из работы 1926 г., стр. 136). «На основании всех этих доводов И. И. Седергольм считает, что необходимо употреблять такое определение этих пород, которое действительно характеризовало бы их проявление и происхождение. Они имеют вид смешанных пород и произошли путем смешения старых пород и позже внедрившейся гранитной магмы и поэтому наименование мигматиты к ним наиболее подходит». Таким образом мигматит являлся для Седергольма *понятием генетическим*.

Предисловие В. Г. Бреггера к тому 50 «Fennia» (1928), изданному к юбилею Седергольма, показывает, что таким же был и общий взгляд современников Седергольма, да и сам Седергольм ясно подчеркивает, что его взгляды согласны с воззрениями петрографов цюрихской школы. «Особенно большое сходство между их идеями и взглядами автора видно в последнем труде Грубенмана и Ниггли» «Метаморфизм горных пород», хотя здесь идеи цюрихской школы и изложены в несколько измененном виде (там же, стр. 120). Бреггер пишет: «Ты привел в систему серию гибридных пород, созданных воздействием гранитных магм на осадочные образования и на основные и кислые породы; ты их сгруппировал сообразно твоим взглядам на генезис (артериты, мигматиты, агматиты, небулиты, стиктолиты, гнейсы, птгматитовые инъекции, полимигматиты и т. д.). Твои исследования привели тебя к признанию радикальных превращений: граниты, инъцируя вмещающие породы, в конце концов могут их полностью переплавить (анатексис), порождая таким путем гибридные магмы, которые, со своей стороны, действуют наподобие начальной магмы (палингенез)».

Для Вегмана мигматиты также не являются группой явлений, он видит в них *генетическую группу* и выделяет два случая их образования, расширяя тем самым генетическое определение понятия.

а) Мигматитовая зона в строгом смысле слова представляет собой *краевую зону вторгшегося в расплавленном состоянии гранита*...

б) Мигматитовая зона в строгом смысле, но в другом значении — это переходная зона, и именно такая, в которой *горные породы превращаются в гранитные породы*<sup>1</sup>.

Седергольм допустил бы самое большое пункт «б», если бы он гласил так: «в которой горные породы превращаются в гранитную магму». Следовательно, Вегман сознательно оставил первоначальное генетическое определение и с самого начала подчинил образование мигматита комплексу явлений «*гранитизации*» и «*фельdspатизации*». Само собой понятно, что подобное расширение определений не только допустимо, но и часто очень желательно. Это вытекает в большинстве случаев из желания придать сходным явлениям различного происхождения одно и то же наименование, которое имело первоначально специфически генетическое значение. Особенно характерно для К. Х. Шеймана, в свете поставленных требований, создание определений, которые носят исключительно описательный характер. Но поскольку, однако, *новое* определение не установлено, возникает, по крайней мере в переходное время, опасность путаницы. Незамостоятельно думающие ученые будут подходить к решению вопроса с разных сторон, пользоваться подходящими аргументами, даже если между последними не существует никакой связи.

Уже термины *гранитизация* и *фельdspатизация* употребляются в различном смысле:

а) только минералогически-структурном: развитие зернистой структуры с полевым шпатом в качестве новообразования.

Речь может идти о чистой перекристаллизации и собирательной кристаллизации, не связанной с вещественным изменением.

б) «быть гранитоподобным» в отношении пород, у которых перекристаллизация связана с пневматолито-гидротермальным привносом вещества, например привносом щелочей.

в) гранитизация, обусловленная инъекционным метаморфизмом.

<sup>1</sup> Сказано «гранитные породы», а не «гранит». Это, конечно, значительно увеличивает многозначность определения.

г) гранитизация, возникающая благодаря ультраметаморфизму, например первоначально осадочных пород, связанная с переплавлением или даже переплавлением совместно с существующим привносом вещества. Сюда относится как крайний случай палингенетическое образование гранитов.

Если пункты «а» и «б» относить к зоне мигматизации, то произойдет некоторое изменение понятий по сравнению с представлениями Седергольма. Поэтому не удивительно, что Вегман обозначает мигматиты, как породы, часто встречающиеся в верхней половине сиалического слоя, несмотря на то, что он подчеркивает, что выплавление и расплавление занимают лишь незначительный объем в массах горных цепей. Значительная часть мигматизации и гранитизации происходит, по его мнению, именно вследствие привноса вещества в породу в виде молекул и атомов. В таких случаях в конечном продукте невозможно разделение субстрата от привнесенного вещества, и таким образом отсутствует важнейшая часть определения мигматита: «Он выглядит, как смешанная порода». Кроме того, в каждом отдельном случае следует проверять, действительно ли имел место значительный привнос вещества, так как каждому петрографу известно, что «обогащение полевыми шпатами» может происходить без малейшего вещественного изменения валового химизма породы, что может быть доказано химико-аналитическим путем. Существуют и другие минералы, содержащие щелочи, как, например, слюда, которые при известных обстоятельствах могут частично замещаться полевым шпатом.

Многие гнейсы обладают точно таким же химическим составом, как и слюдистые сланцы; образуется ли в этом случае больше или меньше полевого шпата, зависит уже от физических, а не от химических условий.

Таким образом становится понятным, что Вегман должен был обозначить, как мигматиты, массу пород нормально и метасоматически метаморфического происхождения (с перемещением вещества), которые ни Седергольм, ни петрографы цюрихской школы так не назвали бы. Это прежде всего область чистой терминологии.

Седергольм назвал исходящие из магмы и проникающие в породы «соки» греческим словом «ихор». «Ихор» гранитов способен непосредственно проникать в древние породы, сообщая им новую, «палингенную» эруптивность даже в тех случаях, когда их химический состав остается неизменным. Однако в большинстве случаев они мало-помалу изменяются, когда напитываются гранитной магмой или ее ихором, и их состав все более и более приближается к составу нового «гранита».

Теперь Вегман<sup>1</sup> возвращается к распространенному, особенно подчеркиваемому Грубенманом и Ниггли представлению, что в породе на границе между различными кристаллами при изменении условий господствуют самые неустойчивые состояния. *«В тонкой пленке между двумя кристаллическими решетками может образоваться беспорядочное состояние, подобное такому в жидких или газообразных телах»* (Вегман, там же, стр. 325). Он называет эти промежуточные участки *«интергранулярной пленкой»* и предполагает, что в ней могут совершаться перемещения привнесенных веществ.

Можно ожидать, что на основании этого определения другие исследователи смогут рассматривать интергранулярную пленку (которая сама по себе не требует привноса вещества) как «сок», или «ихор», и, в конце концов, должны будут назвать мигматитами все, что перекристаллизовывается при содействии интергранулярной пленки или своего рода мобильной фазы, порождающей обмен вещества. Этим замкнут круговорот (в противоположность Вегману, который постоянно предполагает привнос вещества); практически, пользуясь этим выражением, вся совокупность метаморфических пород становится мигматитами. Однако от такого упрощения понятий мы ничего не выигрываем. Большой заслугой Ф. Бекке и У. Грубенмана было указание на то, что обмен растворами или веществами, в упомянутом выше смысле, почти всегда имеет место при метаморфизме пород, что при так называемом обычном метаморфизме в каждый момент времени количество вещества, находящегося в

<sup>1</sup> G. Wegmann, Die Gesteinsmetamorphose, I, Berlin, 159, 162. 1924.

молекулярно-дисперсном или мобильном состоянии, незначительно по сравнению с твердой частью породы.

Сейчас реакции в твердом состоянии вновь подробно изучаются под руководством Дж. А. Хедвелла. Кто занимался этим в лаборатории, знает, как велики должны быть меры предосторожности для того, чтобы получить более или менее однородные продукты. Однако совсем независимо от этих данных, остается впечатление, при наблюдениях в поле и под микроскопом, что почти все без исключения метаморфические породы почти повсюду обнаруживают воздействия, которые могут быть отнесены только за счет *перемещения растворов* (см., например, «Die Gesteinsmetamorphosè», I, 171—174, с заключительным абзацем: «Таким образом, возможно, что подвергнутая стрессу порода при наличии растворов не только может, но при известных условиях должна работать не только механически, но также химически в направлении твердое—раствор (возможная реакция)—твердое». «Весь обмен происходит в микроскопическом объеме, однако в течение геологических времен может привести к более или менее полному переотложению и новой кристаллизации» (см. там же, стр. 155—156).

Даже если мы будем полагать, что возникший продукт является результатом превращения в твердом состоянии, следует иметь в виду, что массы пород никогда не являются абсолютно сухими и что природный метаморфизм воздействует на имеющееся уже вещество<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Это относится также к Х. Зенгу (H. Zeng, Die Migmatitfrage und der Mechanismus parakristalliner Prägung, *Geol. Rund.*, 27, 471, 1936). Вполне справедливо в этой работе указывается, что текстура течения и распределение шлиров не означают переплавления, что должны строго различаться, с одной стороны, отношения, возникающие при метаморфизме между псевдофлюидальными и паракристаллическими образованиями и, с другой стороны, между теми же явлениями, образующимися при застывании из жидкого расплава; многие мигматиты образуются без перемещения растворов. Но это не должно приводить к игнорированию роли растворов в природе, хотя иногда бывает очень трудно судить об этом на основании структуры. Х. Зенг считает необходимым отойти от обычного представления о перемещении растворов и предполагает общую форму перемещения вещества, «при которой вещество само проникает через структуру твердого тела». Перемещение вещества подобного рода несомненно имеет место при каждом сознательном метаморфизме, несмотря на то, что ни то, ни другое не приводит к существенному *сглаживанию первоначальных границ между породами*. У настоящих же мигматитов в противоположность этому следует предполагать значительно повышенный обмен веществ в единицу времени.

Если бы это не было связано с большими количествами одновременно присутствующих растворов высокой температуры, то петрогенетически не было бы никакого основания, наряду с обычными метаморфическими породами, различать еще мигматиты. Но тогда отпали бы и все последующие заключения в отношении переплавления и вторичного образования магм.

Не всегда вокруг порфириобласт присутствуют жилы, трещины, пустоты растяжения, которые позволяют ограничить область, внутри которой, несомненно, происходила кристаллизация из молекулярно-дисперсной фазы. Но это ни в коей мере не означает, что при отсутствии подобных структурных картин отсутствовал и обмен растворами.

Эти соображения также говорят против некоторого расширения понятий, которые в связи с номенклатурой были предложены К. Х. Шейманом<sup>1</sup>. Мигматиты для Шеймана — это грубо смешанные породы с гетерогенной взаимопроникающей связью более древних, нерасплавленных (иногда измененных) твердых составных частей и молодых, подобных магме или даже одинаковых с магмой расплавов. В противоположность Седергольму, Шейман не делает никаких предположений относительно происхождения этих жидких расплавов; последние могли возникнуть на месте (выплавлены), следовательно, не нуждаются в происхождении из гранитной магмы. По определению Шеймана, мигматит от какой-либо метаморфической породы отличают два качественных требования, а именно: участие в превращении «*магмоподобных*» жидких расплавов и «*грубая смесь*». Имеются, несомненно, переходы от жидких расплавов к пегматитовым и водным растворам или от флюидной к газообразной фазе. Ихор Седергольма охватывает все это, поскольку он происходит из магмы. Среди его мигматитов, а также и среди мигматитов, описываемых Шейманом или его учениками, наверно, найдется много таких, у которых «молодая фаза» была пегматитовой, пневматолитовой или гидротермальной. Именно тогда, когда наблюдается тесное смешение с твердой составной частью, трудно решить на основании изучения конечных продуктов, в каком состоянии была мобильная фаза во время метаморфизма. Подобные разграничения представляют значительные трудности уже при изучении рудных месторождений, в которых наблюдаются в общем более гетерогенные и более легко распознаваемые взаимоотношения. В 50 случаях из 100 можно спорить, следует ли считать жидкую фазу действительно «магмоподобным жидким расплавом».

---

<sup>1</sup> К. Scheimann, *Min. Petr. Mitt.*, 48, 297, 1936.

Где находится граница между «грубо-» и «тонкосмешанным» является, естественно, также делом субъективным, но все же ее можно уточнить. Должны быть выделены для макроскопических определений пределы, в которых кристаллизация из молекулярно-дисперсной фазы обуславливает структурную картину, не затемненную ранее существовавшей твердой фазой. Все породы с многочисленными прожилками, друзами, жилами и т. д., т. е., например, жилковатые мраморы, жилковатые сланцы, во всех случаях являются грубой смесью, состоящей из «старых» твердых составных частей и «молодых», образовавшихся из водных растворов компонентов. Однако при их образовании раствор не был подобен расплаву, а, скорее, имел водный характер.

Можно вполне защищать тот взгляд, что для всех гетерогенных пород уместно принять только одно обозначение, характеризующее их структурно-текстурную картину (с более крупными, взаимно связанными частями, непосредственно обнаруживающими переход от молекулярно-дисперсной фазы к твердой). Между тем, необходимо принимать во внимание, что трещины, прожилки или «дыры», при любых их размерах, устанавливаемых в *настоящее время*, не нуждались в *мгновенном* заполнении растворами. Через находящиеся в породе пустоты мельчайших размеров, пребывающие длительное время в «состоянии раскрытия», могли *одновременно* обмениваться довольно большие количества веществ, находящихся в растворе. Мигматит не соответствовал бы такому определению, так как теряются существенные первоначальные его черты.

Шейман сознавал желательность нового, чисто описательного термина (предложенный им термин *флебит* приложим только к настоящим жилковатым породам), однако он ввел при этом ограничение в отношении предположительного характера участвующей в обмене молекулярно-дисперсной фазы. Он пишет: «Поэтому я делаю предложение ввести для таких светлых составных частей, представляющих части расплава или раствора, общее название — просто *метатект*» (промежуточный расплав). Далее (в работе «Метатексис и метабластезис»): «В последнем выводе из этих дискуссий, касающихся образования и содержания термина *мигматит*, этот термин должен получить нейтральное, соответствующее самому смыслу слова значение или определение, т. е. его определение должно исходить из наличия расплава, наряду с твердым веществом (*палеосом* или *метасом*). Это петрографическое определение ничего не говорит о динамике явления, лежащего в основе этого процесса. Следовательно, оно должно быть объединено с любым динамическим толкованием процессов, т. е. с любым направлением этих процессов. Область подобных процессов выходит за пределы метаморфизма. Она определяется как *метатексис* в процессе (тоже в нейтральном смысле), для определения которого безразлично, была ли в отдельных

случаях расплавленная часть инъекций поступившей магмы (энтексис) или экссудативным расплавом (экстексис), или оба эти явления связаны между собой».

Породы с подобной гетерогенной структурой названы Шейманом метатактическими породами. Если имеются вытянутые, подобные порфириобластам, новообразования, которые так же далеко не полно связаны друг с другом в цепочки, облака, шлиры или распределены беспорядочно, то Шейман говорит о *метабластезисе*, для которого было необходимо «пропитывание твердого тела газообразными, флюидными или находящимися в надкритическом состоянии эманациями, с меняющимся привносом вещества, со значительной подвижностью пронизывающих породу фаз». Последнее не совсем верно для подавляющего большинства порфириобластических сланцев, так как уже многократно указывалось, что совместное нахождение твердой и жидкой фаз во время преобразования породы может повести только к постепенно сменяющимся различиям.

Жаль только, что был выбран термин «метатактический», а не какой-нибудь другой, который действительно позволил бы объединить все породы с грубообразливой «двойной» структурой (очковые гнейсы, эруптивные брекчии, жилковатые, мало метаморфизованные породы, мраморные брекчии и т. д.) под одним общим названием, которое не должно говорить специально о «растворенной фазе», чтобы не создавать впечатления, что здесь имеет место принципиально иной процесс, чем при метаморфизме пород с обменными растворами, который проходит короткими этапами, но в течение длительного промежутка времени. При этом надо подчеркнуть «собираение» молекулярно-дисперсной фазы в промежутках между частями.

В действительности трудно установить, откуда происходят отдельные вещества, доставляемые по таким «собирающим» или определенно существующим путям растворами, действующими в течение длительного времени. Даже в состоянии покоя отдельных участков земной коры, но особенно сильно при тектонических движениях, проявляется различное динамическое поведение твердых частей и растворов (включая эманации).

Должны произойти дифференциальные движения, которые часто дают картину инъекции, однако они не позволяют предполагать для инъецированного материала большого пути и единого происхождения из *одного очага*. В этом смысле название «инъецированная порода» часто могло связываться с неправильными представлениями; но никто не стал бы, конечно, применять его к известняку с системной кальцитовых и кварцевых прожилок. «Впрыскивание» (Einspritzen) является часто только «собираением и перемещением», в то время как в других случаях, несомненно, имеют место собственное давление и активное прокладывание пути.

Для тех пород, на основании изучения которых создано определение инъецированной породы и которые, следовательно, относятся к мигматитовой зоне в толковании Седергольма, надо принять во внимание следующие

щее. Они часто происходят из таких глубин, где в силу высокой температуры количество веществ, находящихся в растворе в данный момент времени, больше, чем в каком-либо другом участке земной коры. Нет никаких признаков того, что по мере удаления от этих глубин в более глубокие части оболочки земли имеет место обратный ход температур. Таким образом, эти зоны вполне нормально переходят в зону с господствующим жидким состоянием, т. е. в магматическую зону. Различная подвижность твердого и жидкого приводит к смешению, которое очень затрудняет определение происхождения отдельных веществ в подвижную фазу. Именно в подобных «инъицированных» породах можно отлично проследить резорбционные и ассимиляционные явления. С другой стороны, вполне понятно, что магма вследствие наличия в ней легколетучих компонентов остается еще жидкой значительно ниже  $1000^{\circ}$  и может образовать прочное соединение с контактной породой, бедной водой или безводной, с более высокой температурой плавления, чем температура застывания магмы. Тогда вследствие действительного внедрения и проникновения этих пород магматическими растворами должны возникнуть флебиты. Но подобные магмы с низкой температурой застывания и большим содержанием воды являются по существу гранитными, поэтому вполне понятно, почему так часто встречается связь гранитных и метатектических пород. В отдельных случаях очень полезно установить, является ли данный материал в основном произошедшим за счет выпотов, в смысле Шеймана, или он инъицирован из магматического очага; однако можно с уверенностью ожидать, что в одной и той же области могут быть встречены оба случая с их взаимными переходами, так что в этом смысле действительно уместно нейтральное определение. В общем, однако, остается та же взаимосвязь, которую усматривал в них Седергольм. Чем дальше отстоит данная область от магматического очага, тем больше вероятности говорить только о выпотах, о чисто метаморфической дифференциации, магматическое же воздействие ограничивается «эманациями», которые никоим образом не могут создать структурно грубо смешанные породы.

Надо, однако, предостеречь от того, чтобы не стремиться устанавливать повсюду различия, в смысле Шеймана, между *палеосомом* (древнее, только перекристаллизованное твердое вещество), *метасомом* (древнее твердое вещество, измененное добавочным воздействием привнесенной фазы) и *метатектом*. Взаимодействие обычно бывает настолько тесное, переотложение вещества имеет столь разнообразную природу, что каждое подобное расчленение (если только не подразумевается господство в крупной области) слишком сильно схематизирует явления и приводит к опасному формализму. Вполне вероятно, что в некоторых случаях пластовая или ленточная текстура не имеет ничего общего с расслоением благодаря инъекции, но является результатом дифференциации, основанной на механическом принципе, при мгновенном и всегда только незначительном обмене растворами. Микроскопически, на основе структуры, не всегда можно определить, что перед нами: метатект, палеосом или метасом. Все же, несмотря на все сближения, структуры метаморфических пород так отличны от структур изверженных пород, что нормальный гранит никогда не может рассматриваться как метаморфическая порода.

Впрочем, как это особенно ясно видно из работы Вегмана, с понятием *мигматит* или *мигматитовая зона* связано еще другое представление, которое стоит лишь в некоторой связи с количеством растворенной фазы, имеющейся налицо в данный момент времени. Здесь речь идет о *текучести* или *пластичности масс* (например, фундамента) как *целого*, которые могут привести к диапироподобным «интрузиям» и дисгармоничному поведению по отношению к твердым частям. Говорили об «активизации кристаллического цоколя», о «выступах фундамента» или писали так: «Активированный материал внедряется между древними массами и становится по отношению к ним магмой». Что под этим подразумевается, не всегда формулируется с достаточной точностью. Внутри так называемого *мигматитового фронта* Вегмана находятся также еще имбибиционные породы, перекристаллизованные с помощью везде присутствующей «интергранулярной пленки». У Вегмана, на стр. 334 его работы, написано: «В некоторых местах штоки, пересекающие смятые в складки гнейсы, кажутся гранитными. При более тщательном исследовании некоторые из них оказываются однако продолжением перекристаллизованных и сильно складчатых мигматитов, внутреннее строение которых исчезло». Однако неясно, что имеется здесь в виду, настоящая ли, возникшая благодаря расплавлению магма,

продвигающаяся ли вперед гуща (каша), или только позднейшая перекристаллизация складчатой антиклинали.

Уже К. Ф. Науманн отмечал, что гранит и гнейс нижнего цоколя находились в пластическом состоянии. «Было ли обусловлено это пластическое состояние только высокой температурой, или возникло благодаря одновременному воздействию тепла и воды, или образовалось исключительно благодаря последнему элементу, является вопросом, ответ на который можно ожидать только в будущем» («Учебник геогнозии», II, 155).

Первоначально между У. Грубенманом и А. Геймом было существенное расхождение по вопросу о том, как происходит пластическое переформирование при складкообразовании и при метаморфизме в молодых альпийских горах.

Термин «пластический» не удовлетворял Грубенмана, он хотел представить себе, как могло получиться, что породы, которые, очевидно, в большинстве своем находились в твердом агрегатном состоянии, были перекристаллизованы и собраны в складки без видимых разрывов. Холодная и горячая обработка металлов, а также учет перемещения растворов и обмена веществ помогли уточнить понятия. В настоящее время имеется разработанная номенклатура процессов и не может быть никакого сомнения, что структуры подобного рода возникают без участия в какой-либо отрезок времени больших количеств жидкостей. Мы знаем также, что в процессе нормального метаморфизма может возникнуть картина дифференциальных движений между пластичными и хрупкими телами.

Называть гранито-гнейс более глубоких пеннинских покровов мигматитом, потому что он обнаруживает «текстуру течения», кажется подвижным, неверно, если вспомнить, что по валовому химическому составу неизменные триасовые пермокарбонные породы Пеннина обнаруживают подобную же степень «пластического» преобразования. Если в каждом отдельном случае «степень мобилизации», устанавливаемая на основании структурной картины, будет рассматриваться как признак, присущий только мигматитам, это снова приводит к расплывчатости понятий. Переформирование и кристаллизация отнюдь не обязаны быть синхронными. В остальном можно вполне согласиться с взглядом Х. Зенга

(см. цит. работу), что нельзя вследствие беспорядочности движения просто переносить методы стратиграфически-тектонического анализа на более значительные глубины.

Общая и систематическая петрография получили такое развитие, что позволяют характеризовать каждую породу; петрография обладает наряду с описательными терминами генетически обоснованными определениями с относительно узким значением. Общие понятия, которые получили развитие, исходя из специальных условий, только вредят и вносят неясность, вытесняя более точные определения (например, переплавление, инъекция, пневматолиз, гидротермальный метасоматоз и т. д.). С другой стороны, следует опасаться понимать общие генетические определения столь узко, что в большинстве случаев было бы почти невозможно доказать принадлежность какого-нибудь явления к соответствующей категории. Исходя из сказанного, по нашему мнению, понятие *мигматит* само по себе вообще не является необходимым. Однако, если оставить его значение в смысле Седергольма—Шеймана, то его можно применить для характеристики *ассоциаций пород*, в которых, по нашему мнению, отражаются явления, близкие к только что описанным комплексам. *Мигматитами* должны называться *породы и участки пород, которые обнаруживают большое разнообразие магматических и метаморфических текстурных и структурных особенностей, образуются в переходных зонах между магматическим и твердым состояниями и претерпели метаморфизм, во время которого без какого-либо увеличения объема значительная часть их достигла флюидного, или расплавленного состояния. Ассоциация мигматитов с гранитной магмой не необходима для того, чтобы они могли быть называемы мигматитами, также как на это не влияют источник и история образования их жидкой фазы. Смешанные породы типа вени-тов Хольмквиста могут, таким образом, подойти под это определение*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Как предельный случай сюда включаются, как и у Седергольма, небулиты и родственные им породы, так как здесь благодаря присутствию настоящих, грубосмешанных мигматитов, устанавливается до некоторой степени ясность в отношении общего возникновения всей ассоциации пород.

Последнее расширение понятия примыкает к тому, которое предложил Шейман, но следует особенно отметить, что таким же образом могут возникать и внешне сходные породы, которые, однако, не могут быть названы мигматитами, так как они в своем происхождении не относятся к пограничной области «твердое — жидкое» с точки зрения общего строения земли. В таком случае вещества, отложившиеся из растворов, часто бывают несколько иного рода.

Как неоднократно указывалось, было бы желательно, кроме того, иметь обобщенный термин для *всей совокупности пород* с крупными макроскопическими, хорошо заметными признаками кристаллизации из растворов, который бы включал в себя настоящий мигматит только как составную часть. Сравнительное изучение позволило бы тогда определить типоморфные признаки для мигматитовой зоны; одновременно сделалось бы ясным, что образование мигматитов представляет только крайний случай метаморфизма. Практически при всяком метаморфизме твердые составные части и растворы вступают в реакции взаимного обмена, однако в большинстве случаев таким образом, что в каждый данный момент обмен растворов и присутствующее количество молекулярно-дисперсной фазы очень малы.

К мигматитам не принадлежат (по Седергольму и Шейману) те породы, которые были нормально метаморфизованы при равномерном пропитывании, или имбибиции (даже с привнесом вещества) флюидными, водными или газообразными фазами. Признак «грубой смешанности» у них отсутствует, они не связаны с зоной, переходной к магме, однако вполне понятно, что они могут находиться и в сообществе с настоящими мигматитами. Для них уже давно известны способы обозначения с тончайшим разграничением понятий. При такой постановке не может быть принято расширение понятия в таком виде, как это предложил Вегман. Причины этого приведены выше. Вполне понятно, что вместе с этим должно измениться и понятие «мигматитовый фронт» (область общей мобилизации и пропитывания); такое изменение, вообще говоря, необходимо, чтобы к мигматитовому фронту не относили все преобразованные кристаллобластические

породы и породы с выполнением трещин. Гранит с ясной структурой застывания, придерживаясь этой терминологии, естественно нельзя назвать мигматитом, даже если гранитная магма образовалась путем вторичного переплавления; также не может быть отнесена к мигматитам «гранитизированная», путем пневматолита или эманациями, порода. Несмотря на это, благодаря частичной ассимиляции мигматитовые породы могут обладать *гранитоподобным* составом (однако при гетерогенной структурной картине). Поэтому смешение со структурно-генетическим термином «гранит» исключено.

Надо, однако, еще раз тщательно подчеркнуть, что настоящее предложение находится в противоречии со взглядами Вегмана. На стр. 342 его уже цитированной работы читаем: «Гранитизация подразделяется на начальную, оптимальную и конечную стадии; из всех этих стадий мигматиты могли внедряться во внешнюю оболочку земли и там *затвердевать* как граниты. Их происхождение является в этом случае смешанным». Если «затвердевают» означает «кристаллизуются», то это должно было бы обозначать, что интрузивный комплекс внедрился как жидкий расплав; следовательно, действительно существовали гранитные магмы и комплексы, пропитанные гранитной магмой. Первые, согласно нашему определению, дали бы обычные граниты, последние — мигматиты, которые как раз тем и отличаются от гранитов, что обладают включениями старых твердых веществ, никогда не бывших в расплавленном состоянии. Понятие *мигма* (Рейнгард) можно было бы отнести к только что названному, кашеобразному, еще полностью не затвердевшим участкам.

Необходимо отметить, и это имеет очень большое терминологическое значение в спорном вопросе об образовании гранитов, что Вегман имеет предубеждение к слову *магма*, так много раз хорошо определенному. В современной петрографии этот термин прочно установлен и в числе немногих является общепризнанным. Вегман пишет: «Магмами мы называем принадлежащий внутреннейности земли или оттуда исходящий раскаленно-горячий «молекулярный» раствор, который обладает большим пространственным объемом и геологической самостоя-

тельностью. В связи с магмами находятся и растворы, газы и пары, которые являются причиной возникновения аксессуарных минеральных месторождений. При вулканическом извержении магмы изливаются, как лавы. Уже из этого видно, что магматический расплав обладает сложным составом, что наряду с трудно летучими в нем растворены и легко летучие составные части»<sup>1</sup>.

Если Вегман пишет (стр. 343): «Понятие «магма» употребляется все чаще и чаще и вместе с тем становится все более и более туманным. Эта неясность затрудняет некоторые взгляды на важные геологические и петрографические проблемы, так как это понятие, вместо того, чтобы вносить ясность, вносит туман»,—то он упускает в этом случае действительно однозначное развитие понятия и имеет, очевидно, в виду вместо магмы — «мигматит». Уже значительно раньше, еще до того, как стали говорить о магмах, понятие *плутонические породы* еще туманно связывалось со способностью к интрузиям, т. е. с состоянием, способным к образованию интрузий. Но магма, принимая во

<sup>1</sup> Так же высказывается Ф. К. Дрешер-Каден (*Chemie der Erde*, 14, 234, 1942): «Слово *магма* является понятием состояния, а не понятием о веществе» Однако в первой работе этого автора, в *Chemie der Erde*, 12, 413, 1939—1940, дискуссия с возражением против статьи Г. Фишера не вносит ясности в представление о магмах которое имеет Дрешер-Каден. Очень вероятно, что его не поймут, так как в свое время он не мог опереться ни на одно точное понятие. Этот геттингенский петрограф писал: «Неверны те возражения, что я допускаю превращение моих исходных пород только «на месте». Напротив того, я многократно указывал, что не во всех случаях породы образуются на месте, и что при их превращении они могут быть перемещены в более высокие горизонты, где они, в достаточной степени дискордантные, чуждые данному месту, очень напоминают изверженные породы». И несколькими строками ниже: «О полном переплавлении больших масс пород, в смысле одновременного разжижения всего агрегатного состояния породы, я определенно не говорил!.. Бесчисленные переходы этих реликтов через диффузные зоны растворения в настоящие гранитные породы с несомненностью доказывают участие подобных первичных пород в создании наших гранитов. Точно также я никогда не утверждал, что во многих случаях такие местные процессы расплавления предшествуют полному одновременному разжижению всех компонентов (приводящему к однородному расплаву!). Напротив того, мной подчеркивалось, как особенно существенное, частичное перемещение отдельных веществ, которое возможно только при *частичной мобилизации*».

внимание с самого начала существования лав, предполагает *жидкий расплав*. Петрография должна отклонить ту индивидуальную геологическую точку зрения, которую Вегман формулирует следующим образом: «Согласно первоначальному определению, мигматиты, которые текли в твердом окружении, были «магмами»; они отвечают этому понятию не только условиями большой пластичности, но и своим глубинным происхождением». Почему тогда не могут быть «магмами» кейперские мергеля или месторождения соли, втиснутые в юрские известняки? Что за путаница возникла вместо действительно чистого разграничения понятий? Если вопрос ставится так: «Строгое разграничение между породами магматическими и немагматическими исчезает по мере того, как мы опускаемся на все большую глубину. Это различие установлено и пригодно только для более поверхностных образований и для переходной зоны. В глубине можно еще делать разницу между расплавленным и нерасплавленным материалом, так как это важно для выяснения выделений и движения при вулканических процессах», но необходимо повторить, что неясные, проблематичные явления в фундаменте не должны оказывать влияния на четкие понятия о явлениях в молодых сериях пород, так как это и есть именно тот вопрос *«расплав или твердое»*, который должен интересовать петрографов и который привел к понятию «магма».

Затруднения не устраниаются, если ясно определенные понятия прикрываются выражениями вроде: «пластичность», и «пришедшие снизу», и петрограф не может позволить геологу, чтобы тот, уклоняясь от подробного изучения и выводов, перетолковывал его понятия. Вегман, признавая петрографические обозначения, должен был бы, по нашему мнению, написать: «В то время как в верхних частях и в переходной зоне разделение магматических пород от немагматических не представляет трудности, то уже в более глубоких частях, в древних, часто полиморфных участках земной оболочки это весьма затруднительно. Часто встречаются области, которые долгое время находились в пограничной области «твердое — жидкое» и были уже относи-

тельно подвижны при незначительном содержании жидкой фазы». Он мог бы добавить: «Тогда в зависимости от точек зрения и опытности исследователя эти породы могут обозначаться, как нормально магматические или нормально метаморфические, без приведения веских доказательств в пользу того или иного взгляда. Во многих случаях можно встретить в одном и том же куске породы наряду с нормально магматической структурой и структуру нормально метаморфическую, указывающую на сонахождение в твердой древней составной части соответствующего количества жидкой фазы. Породы подобного рода были названы *мигматитами*. Остается спорным вопрос, куда относить породы, у которых структурная картина несколько сглажена. Они находятся между магматическими породами и мигматитами или между магматическими породами и нормально метаморфическими породами с повышенной внутренней подвижностью (часто с привнесом вещества). Только тщательное полевое геологическое, микроскопическое и химико-аналитическое изучение может с известной вероятностью пролить свет на специфические условия образования. Промежуточное положение занимают магматические породы с многочисленными, только частично резорбированными глыбами, и породы, у которых переплавление в собственно магму было неполным, так что ясно распознаются реликты. Часто бывает целесообразным относить их еще к мигматитам. Ряд обстоятельств затрудняет правильное толкование, а именно: «в конечном продукте не всегда могут быть расшифрованы все различные стадии истории образования и не может быть установлена как последовательность, так и сонахождение».

Так как использование минералого-химической номенклатуры у Грубенмана, сопоставленной с номенклатурой Седергольма, описывающей картину образования, вполне возможно, то в спорных случаях, во избежание бесконечных дискуссий, можно оставить открытым вопрос о генетическом подразделении. Геолог должен, однако, ясно себе представлять, что повышенная пластичность, текучесть свойственна не только *магмам*, но и *породам*, находящимся в определенных физико-хи-

мических условиях; последнее может иметь место при пропитывании или повышенном обмене растворами. Нельзя смешивать геолого-тектоническое понятие *затвердевания* в смысле «становиться твердым» и «текучесть» в смысле пластичности, с петрографическими понятиями *затвердевания* в смысле кристаллизации из жидкого расплава или течения в смысле интрузии магм. Надо также принимать во внимание, что *петрогенетически* кашеобразная масса, состоящая из магмы и из минералов, выкристаллизовавшихся из этой магмы, представляет не что иное, как кашеобразную массу, твердые составные части которой имеют реликтовую породу. В геолого-тектоническом отношении обе могут вести себя совершенно одинаково, в петрологическом же отношении первая представляет *магму*, находящуюся в состоянии кристаллизации, вторая, при содержании большого количества жидких частей, может быть названа *мигмой*, а при уменьшении содержания последних переходит через молекулярно-дисперсную фазу в более или менее мобильную обычную породу. Границу надо провести там, где ее наиболее целесообразно провести как для продуктов первой, так и для мигматитов.

Кроме того необходимо подчеркнуть, принимая эту терминологию, что генетическая многозначность не так уже велика. То, что Седергольм называл мигматитом, остается мигматитом, то, что Шейман описывает, как метатектические гнейсы, остается также мигматитом. Рассмотрим еще один пример, ссылаясь на относительно гомогенный «щелочно-полевошпатовый гнейс Левентина»; при этом возникают следующие альтернативы:

1. Молодой автометаморфный гранит, т. е. гранитная магма, внедрилась во время альпийской складчатости и затвердела под действием стресса (пьезокристаллизация). Вопрос о том, какое применять название: «гнейс» или «гранит», равноценен вопросу о том, в какой степени могут так называемые автометаморфические процессы считаться метаморфическими. *Субъективное* решение привело бы к определению — «гнейсообразный гранит». О мигматите не может быть и речи.

2. Речь идет о «гранитизированных» породах различного рода. Гранитизация является результатом привноса вещества при посредстве молекулярно-дисперсной фазы, в условиях общего пропитывания породы, однако последняя остается в целом твердой. Щелочно-полевошпатовый гнейс в этом случае был бы метаморфизованной породой, продуктом пневматолитового до гидротермального метасоматоза. Термину «мигматит» здесь нет места, следует употребить название «смешанный гнейс».

3. Гранитизация явилась следствием переплавления более древнего вещества, сопровождавшегося привнесом нового материала, не приводившего однако к гомогенной магме. Массы значительного объема были бы тогда одновременно жидкими. Название «мигматит» безусловно было бы уместно, если бы временное сонахождение старой и новой составных частей нашло свое отражение в структурной картине. Но так как этого, как уже упоминалось выше, не наблюдается, то и вопрос о названии встречает ряд трудностей. При указании на подобный способ образования, определение «мигматит» все же может, до известной степени, применяться.

4. Древние граниты переплавлены (палингенез) при условиях, описанных в пункте<sup>1</sup>. Обозначения: палингенный, гнейсообразный гранит.

5. Древние граниты метаморфизованы, разумеется, при участии жидких фаз и обмена растворами. В некоторых местах более молодая магма внедрилась в виде жил. В подобных участках также повысился обмен растворами, который, однако, в остальной массе не превышал нормального метаморфизма ката- и мезозоны. В целом о термине «мигматит» не может быть и речи. Щелочно-полевошпатовый гнейс является ортогнейсом.

Химический характер, род боковой породы, условия взаимоотношения пород, по мнению С. Казазопра и на основании личного изучения, исключают пункты 1—3; пункт 4 так же мало вероятен, следовательно, остается только пункт 5. Если другие исследователи придадут этой неуверенности большое значение, то важно точно указать, как они себе представляют процесс образования; обозначение «мигматит» является слишком шатким, тем более, что ограничение этого понятия еще не достигнуто, и все здесь сказанное надо рассматривать как предложения, и как предостережение от возможного искажения понятий.

Несомненно, что уклонение от определения Седергольма — Шеймана, дало повод *объединить под общим названием «мигматит» явления, которые петрология уже давно расчленила.*

Об этом тем более надо сожалеть, так как противникам такого расширения понятий часто бросается упрек, что они не признают первоначального значения понятия «образование мигматитов». Это не простое совпадение: породы подобного рода действительно имеются, точно так же как и некоторые гранитоподобные породы при ближайшем изучении должны быть признаны за неграниты. Отсюда вовсе не следует, что все должно называться мигматитами; этим ничего не достигается и в особенности не создается картина частоты проявлений подобного рода конвергентных явлений. Опасность недооценки, имея в виду работу Ван-Беммелена, однако, существует.

Эманационная гипотеза А. Холмса сильно способствовала скептицизму в отношении доказательства магматического происхождения пород. На это уже указывалось в более ранней работе (*Schweiz, miner. und petr. Mitt.*, 17, 510, 1938), так что можно быть кратким.

Для полного метасоматического изменения породы должно быть привлечено огромное перемещение вещества. Во всяком случае, на стр. 345—346 своей работы Вегман совершенно правильно писал: «Во всех до сих пор исследованных горах, источник привноса вещества не был с достоверностью установлен. Оно могло бы притти из глубины... Пространства, из которых перемещались эти вещества, должны быть богаты ими. Отдавая последние, они сами должны сильно изменяться. Если мы предположим, что вносимые вещества происходят из глубинных жидких расплавов, то можно допустить две возможности: 1) эти вещества накопились в результате кристаллизационной дифференциации из жидкого расплава; 2) они были выжаты вверх какими-то процессами, происходившими в глубинных частях земли».

Существует очень большая литература о роли легколетучих компонентов магмы, о возможности их выделения и их воздействия. Те, кто старался внести ясность в эту область, имели полное право остерегаться того, чтобы, идя по следам Л. Буха (магнезиальный метасоматизм), не выбирать важные комплексы явлений исходным пунктом «универсальной теории». Если щелочно-габброидная, габброидная или даже перидотитовая магма должна поставлять огромное количество щелочей, необходимых для гранитизации известняков, глин и песчаников, то надо было бы произвести некоторые вычисления или привлечь приведенное выше третье положение Вегмана. Однако все подсчеты теории дифференциации в десять раз более вероятны. Почему мы никогда не находим в областях развития огромного количества основных магматических пород, такого обилия пневматолитовых явлений, которое наблюдается в контакте с гранитными магмами? Как может быть, что на Скандинавском щите среди древнейших пород находятся реликто-

вые структуры по метаморфическим осадкам, которые совсем не изменены метасоматически или изменены только частично? Пневматолитический привнос вещества встречается часто, однако он не может быть *deus ex machina*, который любую породу превращает совсем в другую. Он также должен иметь свою первопричину, и мы ее знаем почти во всех случаях, где это удастся доказать. Само собой понятно, что отличить метасоматически измененную породу гранитоподобного состава от гранитов (как продуктов кристаллизации из магмы) — задача вполне выполнимая для петрогенезиса, и было бы нецелесообразно подобные метасоматически-метаморфические породы называть мигматитами; последнее только что подробно обосновано.

Обобщая, пожалуй, можно сказать, что *граниты* и *гранодиориты* с обычными химическими, минералогическими, структурными и текстурными признаками обладают типичным характером магматических пород. Отнесение их к числу нормально метаморфических пород, таких, как, например, метасоматически измененные осадки, представляется невозможным для всех тех петрографов, которые имели возможность изучить в поле и в лаборатории большой материал по изверженным и метаморфическим породам. Новые попытки рассматривать граниты как измененные подобным образом породы не опираются на основательное изучение. Настоящие мигматитовые породы в отдельных геологических образованиях связаны с краевыми частями гранитов и их естественнее всего толковать в смысле Седергольма, Грубенмана, Ниггди, Холмквиста, Шеймана. Так называемые «гранитизированные» метаморфические породы надо отличать от гранитов и гранодиоритов и более точно обозначать, в зависимости от типа метаморфизма.

Совсем другой и гораздо более трудно разрешимой является проблема генетической связи некоторых *гнейсов*. Если мы назовем гнейс ортогнейсом, то, значит, мы хотим сказать, что он был до метаморфизма изверженной породой и превращен без большого изменения вещества привноса или выноса. Несомненно, однако, что многие гнейсы, которые раньше назывались просто ортогнейсами, оказались парагнейсами или смешанными

гнейсами. Мы назвали бы такую породу смешанным гнейсом, если бы исходный продукт уже представлял смесь осадочных и магматических компонентов, или если бы рука об руку с метаморфизмом сильный привнос вещества изменял бы первоначальный химический характер исходной породы. Так, например, многие полосчатые гнейсы, богатые полевым шпатом, не являются просто ортогнейсами гранитного происхождения, а инъицированными гнейсами, вновь метаморфизованными мигматитами или породами различного происхождения, измененными пневматолитовым или гидротермальным привносом щелочей. Но это уже давно известно. И именно для решения этой важнейшей проблемы все названные выше работы выдвигают новые точки зрения. «Многозначность» такого рода, особенно в отношении богатых полевым шпатом *гнейсов*, не следует смешивать с вопросом о возможностях образования *гранодиоритов* и *гранитов*, обнаруживающих магматическую структуру.

### ИДИОГЕНЕЗИС И ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

Затвердевший из жидкого расплава гранит является магматической породой, независимо от того, существовал ли жидкий расплав (магма), начиная со времен возникновения земли, образовался ли он из других жидких расплавов путем дифференциации, или возник благодаря расплавлению некоей твердой субстанции. Процессы могут комбинироваться, магматическая порода может быть только остатком магмы; все эти возможности не влияют на название «магма» и «изверженная порода». *Магма — это огромная, связанная часть материи внутри литосферы, где-то и как-то возникшая, которая находится или полностью в жидком состоянии, или способна к переходу из этой фазы в твердое состояние.* Застывшие продукты магмы — это магматические породы. Вулканология учит нас, что имеются магмы различного состава, петрография раскрывает перед нами все многообразие магматических пород.

Вопрос о том, идет ли здесь речь о кажущейся нам случайной, или же до некоторой степени закономерной ассоциации пород, решается подробными исследованиями

в пользу последней точки зрения. Это положение привело к учению о *магматических провинциях*, для которых пытались установить и объяснить правила совместного нахождения магматических пород. Были приняты во внимание различные возможности. Были сделаны попытки найти критерии, которые позволили бы решить, является ли правильным то или другое объяснение, или давали бы ответ на вопрос, в каких отношениях друг к другу по частоте проявления стоят различные причины.

1. Простейшее представление исходит из местного, более или менее автохтонного образования магмы. Все разнообразие пород должно в таком случае являться отражением имевшегося до этого многообразия магм, возможно измененных в процессе выравнивания (*Ausgleichungsvorgänge*). *Эта попытка объяснения потерпела полную неудачу.* Такое представление находится в противоречии с временным характером магматических процессов, далеко идущей независимостью провинциальных особенностей проявления от особого состава литосферы вблизи магматических пород и от условий связи магматических пород между собой. Однако объяснение некоторых особенностей, которые раньше включались в общую картину как «патологические отклонения по сравнению с нормальными ассоциациями», указывают скорее на влияние ассимиляции при образовании отдельных составов магмы и ассоциаций.

2. Первая серьезная попытка поставить в генетическую связь друг с другом различные магмы или, что одно и то же, различные магматические породы одной области и одной определенной геологической эпохи принадлежит Р. Бунзену. В 1851 г. он установил, что магматические породы исландской провинции по содержанию кремнекислоты располагаются в один определенный ряд, в котором содержание  $\text{SiO}_2$  определяет до некоторой степени соотношение остальных составных частей. Исходя из нормально трахитовой — теперь мы бы сказали гранитной — магмы с 76,67 весовых %  $\text{SiO}_2$  и нормальной пироксенитовой — мы бы назвали ее базальтовой — с 48,47 весовых %  $\text{SiO}_2$ , — он рассматривал состав образовавшихся таким образом изверженных

пород приблизительно как последовательные члены смешанного ряда обеих названных магм. Поэтому Бунзен высказал гипотезу, что в Исландии находятся два источника (очага) магм — кислой и основной, — которые могли смешиваться друг с другом, почему и возникло наблюдаемое разнообразие изверженных пород. Таким образом, Бунзен установил, что между магмами одной геологической провинции возникают тесные химические взаимоотношения, которые должны быть интерпретированы генетически. Как эта первая концепция закономерности внутри какой-нибудь магматической провинции, так и теория смешения получили дальнейшее развитие.

В отношении первого пункта представляют наибольший интерес старые, к сожалению, почти забытые работы Б. Котта о рудных месторождениях (1864)<sup>1</sup>, на которые мне указал А. Штрекэйзен. О разнообразных изверженных породах Баната, которые очень сильно варьируют по химизму, структуре и минералогическому составу, Б. Котта говорит следующее (стр. 13): «Несмотря на это, все эти разновидности геологически настолько между собой связаны, что для них чрезвычайно желательна фиксация этой общей связи. Я поэтому хочу здесь обозначить их все как *банатиты*, однако не вводя нового названия в петрографию, т. е. я понимаю под словом *банатиты* не породу определенного состава или структуры, но совокупность всех изверженных масс, которые в Банате и в прилегающих областях внедрились почти одновременно, во всяком случае только после отложения юрской формации, вероятно, даже после мела, но раньше базальтового». И на стр. 41—42: «Результаты, которые следуют из геологического, минералогического и химического исследований всех этих изверженных пород, которые я обозначил общим названием, имеют, как мне кажется, общий интерес, так как они представляют случай, когда застывшие плутонические продукты одного и того же большого\* эруптивного разлома (*Eruptionsspalte*) и принадлежащие к одному и тому же, во всяком случае послеюрскому времени извержения, очень различаются по своей текстуре, так же, как и по химическому и минералогическому составу. Эти породы обнаруживают зернистую, порфирированную и плотную текстуры, они состоят из полевого шпата, роговой обманки, слюды и кварца, в которых то господствует, то отсутствует то один, то другой минерал; и они колеблются по различному содержанию в них кремнекислоты между *базитами* и *ацидитами*, если можно применить такое краткое обозначение для двух главных групп основных и кислых изверженных пород».

<sup>1</sup> B. v. Cotta, «Erzlagerstätten in Banat und in Serbien», Wien, 1864.

Затем Б. Котта переходит к разбору попыток объяснения (Бунзен, Петцольд, Рихтгофен) этого различия и родственных связей. Он пишет о гипотезе Бунзена: «Если бы были мыслимы подобные, разделенные друг от друга очаги извержения в глубине земли, то было бы невозможно этим объяснить, почему во все геологические периоды извергались как кислая, так и основная магма, иногда по соседству, иногда далеко друг от друга, однако часто, при этом меняясь периодически в пространстве. Поэтому обособленные очаги должны были часто находиться близко друг к другу и, с другой стороны, их взаимоотношение часто менялось. Удовлетворить нас эта гипотеза не может».

Петцольд (1840) и позднее Ф. Рихтгофен (также Сарториус, Ф. Вальтерсхаузен и, как мы увидим дальше, другие исследователи) предположали первоначальное расположение материи, а также магмы, по характерному для них удельному весу, причем уже Рихтгофен пытался объяснить порядок последовательности извержения переплавлением древних ацидитов. Весьма возможно, что материя была распределена или расщеплена по двум различным законам. Б. Котта пишет по этому поводу: «Эта идея действительно заслуживает внимания. При этом необходим, как основное условие, лишь одинаковый состав внутренности земли, несколько меняющийся с глубиной... Разница в химическом составе изверженных пород будет тогда только следствием происхождения магмы из различных глубин или расплавления и впавления при поднятии».

Однако он здесь же возражает особенно против переплавления, наступающего вследствие возвратной последовательности магматических пород<sup>1</sup>, считая эту проблему еще не решенной.

Лучше всего решил постановку вопроса в целом, еще на заре петрологии, Дюроше. Это показывает одно только заглавие его работы, вышедшей в 1857 г.<sup>2</sup> Во вступительном слове сказано: «Настоящий труд — это сравнительная петрология; его надо расценивать как опыт общего синтеза пирогенных пород, рассматриваемых с четырех точек зрения: их химического и минералогического состава, их образования и их классифи-

<sup>1</sup> В. v. Cotta, стр. 45: «Мы, наконец, не можем забыть, что там, где базиты и ацидиты, которые принадлежат одному и тому же большому геологическому периоду, выступают по соседству друг с другом в одной и той же области, очень часто, если не всегда, базиты являются более древними, в то время как можно было бы ожидать, что продукты переплавления или промежуточные породы должны были бы появиться раньше и только уже вслед за ними должны были появиться чистые породы глубин».

<sup>2</sup> P. Duroché, Essai de pétrologie comparée, ou recherches sur la composition chimique et minéralogique des roches ignées, sur les phénomènes de leur émission et sur leur classification, *Annales des Mines*, 11, сер. 5, 217, 1858.

кации». Судя по его высказываниям, «все изверженные породы, как самые молодые, так и самые древние, были просто образованы двумя магмами, которые существовали под твердой земной оболочкой и каждая из которых занимала определенное положение». Он называет их «кислая» и «основная» магмы, дает средние величины границы отклонений отдельных вариаций. Первая магма расположена ближе к поверхности и является более легкой, вторая расположена глубже и по своему удельному весу тяжелее.

«Твердая земная кора располагается таким образом на жидкой основе, сложенной двумя различными слоями: верхним, наиболее тугоплавким, лишь наполовину расплавленным или находящимся в тестообразном состоянии вследствие избытка кремния, отличающегося своей вязкостью, и нижним — содержащим значительно меньше кремния и дающим атомные отношения, варьирующие от бисиликатов до силикатов, содержащих полуторные окислы, более жидким и в то же время более плотным, который, кроме того, повидимому, очень богат окисью железа, особенно в некоторых своих частях... Именно в верхнем слое и преимущественно сосредоточиваются наиболее легкие и наиболее летучие части, такие, как щелочные металлы, фтор, бор и т. д.; и, действительно, в гранитных породах, происходящих из этого слоя, обыкновенно находят фторсиликатные минералы или боросиликаты, вроде слюды, топаза, турмалина и т. д.»

Более подробно рассматривается меняющееся соотношение составных частей в обеих магмах, лучше сказать — магматических группах.

Благодаря своего рода «расщеплению или ликвации», происходящих в малом масштабе, внутри кислых или основных магм должны возникнуть изменения, и на контакте обеих магматических групп образуются смеси среднего состава. Породы таких смешанных магм Дюроше называет «гибридными» (например, сиениты). Несмотря на это, в крупном масштабе должна господствовать общая картина подразделения на кислые и основные магмы.

Рассматривается влияние поступления морской воды в магму (обогащение Na), затем Дюроше переходит к попыткам определить, можно ли установить развитие магматических внедрений во времени<sup>1</sup>. При застывании внешней магматической зоны образуются

<sup>1</sup> В этом отношении следует указать на попытку В. Клюпфеля (W. Klüpfel, *Zentralblatt für Mineralogie*, 1941) генетически разгра-

первозданные граниты (le granite primitif). Само собой понятно, что в древнейшие времена эти породы преобладали, и основная магма занимала не больше, чем 0,01 пространства. Основные магмы были вторгнуты значительно позднее в эти «кристаллические области», уже после того, как внешняя магматическая оболочка затвердела. «Позднейшие внедрения принадлежат, если можно так выразиться, к вторичным, последующим явлениям. Посмотрим, не находятся ли эти факты в соответствии с выводами из моих исследований: в момент, когда, сопровождая дислокации, возникшие в нескольких точках земной коры, появляются расплавленные массы, поднятые давлением вышележащих масс и силой расширения упругих флюидов, верхняя часть подвижной зоны проникает вверх, вдоль складок; именно таким путем происходит большие извержения, выводящие на дневную поверхность гранитную магму. Но это внедрение не могло произойти без того, чтобы не изменить условий равновесия расположенной ниже основной магмы; некоторая часть последней вообще была увлечена вслед за магмой, богатой кремнекислотой, в извилины и трещины земной коры. . . Но после затвердевания гранитные массы подвергались сжатию и растрескались; различные проявления дислокаций вызвали в них такое же, как и в соприкасающихся с ними слоистых породах, образование трещин, по которым устремились инфильтрованные порции еще жидких основных масс, пришедших в движение во время внедрения гранита. Такова, по видимому, причина образования даек и более или менее значительных масс диорита, которые пересекают гранитные формации и окружающие породы. Кроме того, внутренние части силикатной магмы, не вполне еще затвердевшие, вызвали подобные же явления и привели к образованию жил и штокверков гранита или пегматита» . . .

В мезозойское и в третичное время произошло значительное изменение, магмы нижних слоев стали еще более активными, однако и верхний слой магмы, поскольку он имелся налицо, точно так же прорывался наряду с гибридными магмами.

В настоящее время можно различать два типа извержений:

1. Внедрения первого порядка, происходящие непосредственно из жидких слоев, на которые опирается земная кора.

2. Внедрения второго порядка, или вторичные, имеющие очагами остатки материн, оставшиеся зажатыми во внутренних частях земной коры (магматические камеры).

Изолированные магматические очаги различных глубин доставляют главную массу материала для вулканов, в которые могла попасть морская вода и тем самым обусловить преобладание Na.

Дюроше вместе с Бунзеном рассматривает гранитную магму наряду с базальтовой как первичный или по крайней мере очень древний, повсеместно распростра-

нить плутонизм, древний и новый вулканизм, как это сделал Дюроше и другие исследователи около 100 лет назад. По счастью, сохраняет свою силу предостережение от злоупотребления принципом актуализма.

ненный продукт расслаивания (Seigerungsprodukte). Обе магмы рассматривались как изменчивые сами по себе и поэтому способные давать гибридные продукты. Генетический ряд гранит — аплит — пегматит — лампрофир (или молодой базальт) трактуется ими почти так же, как он понимается и в настоящее время. Широкое распространение гранита в прошлые геологические времена является, по Дюроше, результатом залегания друг на друге обеих магматических зон, из которых внешняя интродировала и затвердевала немного раньше. В течение ряда геологических эпох, по мере постепенного остывания земли, должно было сделаться заметным определенно направленное развитие способных к интрузиям магм. Для своего времени концепция Дюроше была достойным внимания синтезом накопившихся фактов. Только позднее стали известны некоторые явления, находящиеся в противоречии с концепцией Дюроше, которые еще и сегодня ускользают от взглядов геологов:

а) Уже с древнейших времен выступают огромные массы основных изверженных пород, например в южной Африке и в Сев. Америке, которые почти повсюду прорываются несколько более молодыми кислыми магмами. Это представляет отклонение от последовательности извержения, которую следовало бы ожидать, исходя из сплошного распределения магмы.

б) Подробное исследование геолого-тектонических циклов показало, что активность магмы в различные эпохи начинается с подъема основной магмы, которая только во время орогенеза вытесняется кислой магмой. Часто после меняющейся последовательности при извержении в конце процесса появляется опять основная магма. Это также противоречит простой концепции неизменного расположения слоев магмы.

в) Детальное исследование молодых горных цепей Тихоокеанского кольца показало, что в последние геологические эпохи в земную кору интродировало не меньше масс гранитных магм, чем в предшествующие. Универсальное изменение магмы, начиная с архея, является, таким образом, также неоправданным. С другой стороны, может быть установлено, что в каждом участке земной коры химизм магматических продуктов изменяется

параллельно с консолидацией данного участка, с переходом от орогена к кратогену. Это развитие с одинаковой тенденцией повторялось неоднократно в различные моменты истории земли и указывает на процессы, которые не опираются на раз навсегда данные и остающиеся неизменными взаимные расположения (конstellация), но должны происходить каждый раз по-новому. На основе этих фактов опровергаются построенная многими исследователями (например, Мишель-Леви) теория двух магм и теория перманентности слоев магмы.

г) В молодых, не сильно расчлененных эрозией горных цепях обнаружено, что *средние* магмы, представленные андезитом, монцонитом и т. д., *внедрились в довольно значительных количествах*<sup>1</sup>. Их внедрение падает в большинстве случаев на отрезок времени между началом и концом орогенеза. Преобладание основной и кислой магм над средними должно получить совсем другое объяснение, чем существование двух главных типов магм.

*Вероятнее всего дело идет о начальных и конечных стадиях одного и того же процесса развития, средние члены которого могут сохраниться только при благоприятных обстоятельствах* (интрузия или соответственно экструзия, в подходящий момент). Если продукты застывшей излившейся наружу средней магмы будут уничтожены процессами эрозии, то господствующими становятся породы исходной магмы или породы конечных стадий некоторых циклов развития. Подобные явления наблюдаются в Сев. Америке, Кордильерах, Андах и в восточноазиатской группе островов, где они, как правило, преобладают и сделались исходным пунктом всяких гипотез.

Противопоставление основной и кислой магм друг другу имеет еще и другие основания. Оно целесообразно с чисто классификационной точки зрения и, поскольку

<sup>1</sup> В ранее цитированной работе Р. А. Дэли (R. A. Daly, «Igneous rocks and the depth of the Earth», New York — London, 1933, есть русский перевод, 1935) установлено, что из площади, занимаемой излившимися породами, должно быть отнесено к андезитам 9375,56 кв. км, к авгитовым порфиритам — 663 кв. км, к трахитам и фонолитам — 31,2 кв. км.

речь идет о глубинных породах, основывается на их различной окраске. Черные, зелено-черные, черные с белыми вкраплениями породы противопоставляются светлым, красноватым (red rocks) или белым породам. При этом большей частью упускают из вида, что разница в химическом составе между перидотитом и диоритом значительно больше, чем между диоритом и гранодиоритом, гранитом или фельзитом. Так возникает совершенно неверное представление о разрыве между двумя магмами: кислой и основной, или, что одно и то же, — между кислыми и основными изверженными породами, опирающееся только на внешний вид или на то обстоятельство, что при данной величине зерна окраска породы зависит от концентрации в ней меланократовых компонентов.

Бессознательно присоединяется сюда также кристаллизация кварца из магмы, казавшаяся раньше таинственной. Таким образом, в переоценке действительности магм (кислой и основной) заключена большая доля «научного суеверия», являющегося пережитком прошлого, давно преодоленным успехами полевой петрографии, микроскопии и физической химии.

Взгляды, противоречащие простой теории смешения, возникли, вообще говоря, давно. Так, Кьерульф исходил из 4-х, а Хохштеттер из 16 магм. Ф. Шерер, при попытке связать химизм с условиями залегания и возрастом (подразделение на плутоны, плутоновулканы и вулканы), рассматривал химизм многих магматических типов как результат загрязнения; отсутствие строгой аддитивности в поведении компонентов внутри одной и той же магматической серии также не могло остаться незамеченным и т. д. Однако в несколько иных формах сохранилась вплоть до сегодняшнего дня попытка приписывать гранитной магме, в широком смысле слова, особую роль (идиогенезис).

Кислые магмы, по крайней мере, более молодых геологических эпох, считаются вторичными, противопоставляются ювенильным основным магмам, которые считаются образовавшимися в результате расплавления отдельных твердых участков земной коры. На это уже обращалось внимание в главе «Метаморфизм и магматизм». Те исследователи, которые не хотели заходить далеко и

принимать более или менее произвольный привнос вещества, позволяющий превратить любой осадок в гранодиоритовый или гранитный расплав, предполагали в глубине более древние граниты, которые при соответствующем привносе тепла могут вновь перейти в жидкое состояние. В некоторых случаях вполне возможно, что именно таким путем возникают палингенные граниты, однако проблема образования подобным путем постархейских гранитов не может быть разрешена. Молодые гранитные интрузии не стоят ни в какой видимой связи с более древним распределением пород. С другой стороны, имеется такая тесная связь между химизмом и минералогическим составом основных и средних пород одной провинции, сходных по возрасту, что объективно невозможно допустить различное происхождение основных и кислых типов магм в одном и том же геологическом комплексе. И, наконец, если древние граниты могут быть первичными, почему не могут быть таковыми же и более молодые, тем более, что в архейское и постархейское время в областях со сходным геолого-тектоническим строением проявлялись совсем аналогичные магматические типы. Так как эта гипотеза *литогенного происхождения* кислых магм насчитывает еще и сегодня много сторонников, то некоторые детали ее должны быть рассмотрены подробнее. Это можно сделать противопоставляя ее другому, широко распространенному взгляду — учению о *магматической дифференциации*.

Однако здесь не место входить в подробности этой теории, тесно связанной с развитием учения о магматических провинциях. Хотя идеи расщепления и ликвации очень стары, однако эти взгляды основываются на исследованиях последних десятилетий, о которых можно здесь подробно не упоминать, считая их известными. Речь может идти о единственной теории образования гранитов, которая действительно неуклонно развивалась из первых резких представлений на основании полевых геологических, микроскопических, химико-аналитических и физико-химических наблюдений и которая превратилась из «мнения» в рабочую гипотезу, над обоснованием которой будет продолжаться дальнейшая работа.

Первоначально сторонники магматической дифференциации<sup>1</sup> утверждали только следующее: разнообразие магматических пород возникает всегда заново в каждый период активности магмы из уже имеющейся значительно менее многообразной или даже из одной более или менее гомогенной исходной магмы.

И эта гипотеза дифференциации должна «непременно» привести, по Баклунду, к следующим выводам:

1. В силу тектурных, структурных, минералогических и химических переходов между доальгонскими породами необходимо признать их одинаковый первичный возраст.

2. Так как метаморфизм создал переходы между первоначально возникшими глубинными и поверхностными породами, принцип актуализма не может быть действительным.

Исследователь, наблюдавший эти явления в молодых горах, сложенных слоистыми породами, возраст которых можно установить, не будет знать, что ему делать с этим доказательством «несовпадения», которое вместе с тем должно быть доказательством против магматического образования гранитов. Кроме того, работа содержит некоторые противоречия. Так, например, на стр. 42: «Вывод 2 (временные изменения в количественных соотношениях между кислой и основной магматической деятельностью) совершенно не учитывает, что все основные породы, развитые в областях кристаллических щитов, которые на картах и относящихся к ним описаниях назы-

<sup>1</sup> Обсуждение теории дифференциации с Баклундом (H. G. Baklund, Die ältesten Baueinheiten von Fennoskandia. Ein Beitrag zur Deutung des „Urgebirges“, *Mitt. der Naturf. Gesellschaft Schaffhausen*, 17, 31, 1941), к сожалению, вряд ли обещает успех, так как этот автор придерживается учения, существующего только в его фантазии и совсем непонятого для нас. Он, например, допускает «крайне одностороннее применение многосторонне разработанной дифференциационной гипотезы», «слишком расширенную дифференциационную гипотезу», «слишком широко построенную дифференциационную гипотезу», «последовательную дифференциационную гипотезу», «слишком последовательное применение крайне обобщенной гипотезы дифференциации». Строгое истолкование этих нам непонятных представлений должно было бы «требовать магматического (дифференциационного) происхождения» для органических осадочных пород, графитсодержащих метаморфических пород, известняков, кварцитов, фосфатов, конгломератов, филлитов.

ваются «амфиболиты», «диоритовые сланцы», «сланцевые габбро», «сиениты», «серпентины», частью также — «габбро» и «диориты», должны сравниваться, несмотря на незначительное химическое различие, с базальтами новейшего времени как геологически, так и согласно их положению, химизму и распространению». На стр. 55 написано: «Уже «амфиболитизация» представляет комплексный тип метасоматоза» и также говорится об «отчетливой химической разнице между базальтом, с одной стороны, и его глубинным аналогом габбро,—с другой», в то время, как на стр. 59 находим: «магматическими» в полном смысле слова могут считаться только базальты. Они образуют замкнутую группу благодаря в общем однородному составу, их противоположности в химическом отношении всем известным осадочным породам и по их значительному избытку тепла, которым они обладают, формируясь даже на земной поверхности». При этом каждый петрограф знает, что соответствующий базальтам состав амфиболитов представляет яркий пример состава пород, который может соответствовать как орто-, так и парапородам.

Однако при более или менее полном переплавлении отсутствует разнообразие пород; оно не зависит от состава ранних магм какого-нибудь периода и не может фигурировать в настоящее время под именем магматической дифференциации. Так как именно в последнее время широкое распространение получил взгляд, что кислые магмы представляют только продукты переплавления, в то время как другая сторона утверждает, что между образованием средних и кислых магм из основной не имеется принципиального различия, то по принятой в настоящее время терминологии узкое понятие «магматическая дифференциация» может быть определено следующим образом.

Многособразие изверженных пород какого-либо геологического комплекса обусловлено в первую очередь процессами, которые являются естественным следствием внедрения магмы и которые происходят от *изменения состояния самой магмы*. На направление дифференциации, а также и на род возникающих продуктов может оказать вторичное влияние ассимиляция, однако, имеются *внут-*

ренние факторы, определяющие всю совокупность наблюдающихся переходов. Исключительно характерными формами «магматической дифференциации» являются *простая и комплексная гравитационная кристаллизационная дифференциация*; тот факт, что в настоящее время подразумевают главным образом ее, когда говорят непосредственно о дифференциации, объясняется тем, что эта теория построена стройно и подкреплена фактами и наблюдениями. В журнале *Min. petr. Mitt.* XVIII, 610, 1938 была изложена сущность теории комплексной гравитационной дифференциации. Здесь нас интересует только вопрос образования гранитов.

Представление, что гранитная магма является по существу продуктом дифференциации при кристаллизации основной магмы, так же как и представление, что гранитная магма могла образоваться при переплавлении осадочных образований, исходит из определенных наблюдаемых фактов, опытов и физико-химических «образований». В обоих случаях были выдвинуты возражения, поскольку чересчур упрощенные эксперименты, которые не могли дать правильного отображения природных процессов, якобы неверно передавали течение процесса. Это так несущественно, что не имеет смысла останавливаться на этих «возражениях». Еще Кейльгау в 1837 г. писал: «Вполне можно представить себе случай, что какой-нибудь факт, который химия до сих пор должна рассматривать как проблематичный, может получить объяснение и решение на основе геогностических соотношений, между тем геолог обращает свое внимание на процессы, происходящие в большой лаборатории природы и достигает объяснения явлений, которые хотя и относятся к области химии, однако в искусственной лаборатории наблюдаться не могут».

Так как значение наблюдений и фактов, говорящих о наличии магматической дифференциации во время магматической интрузии или во время ее остывания, велико, то это важное явление, вызывающее многообразие пород, не опровергается. Однако с различных сторон раздаются возражения, что процессы подобного рода никогда не могли бы привести к наблюдаемым *количествам* гранитных магм; и теория дифференциации должна быть допол-

нена теорией идиогенезиса гранитных магм. Некоторыми возражениями подобного рода мы должны сейчас заняться.

а) *Общие соображения.* Большая часть подобных возражений уже была рассмотрена в настоящей работе в главе «Тектоника магмы — тектоника коры». Тем не менее, следует обратить внимание на некоторые пункты. В одной, очень важной для нашей темы работе<sup>1</sup> Ф. Дресчер-Каден совершенно правильно обратил внимание на то, что вопрос о предистории образования магм слишком мало изучался.

«Как здесь быть? Мы никогда не будем иметь возможности изучать образование магматических расплавов путем наблюдения. Мы можем, однако, достигнуть известного прогресса путем критического наблюдения над процессами, происходящими в затвердевающих расплавах (контактные и гибридные образования), или путем обсуждения предполагаемого состояния земной коры».

Действительно, петрограф, который хочет рассмотреть процесс образования породы, довольствуется большей частью указанием на происхождение из магмы (которую он еще не называет породой). Как неоднократно утверждалось, для систематического распределения магматических пород не имеет значения, была ли магма все время на месте, изменилась ли вследствие ассимиляции, находясь перед этим в вязком или кристаллическом состоянии, или была выдавлена при расплавлении захваченных пород. Любая другая точка зрения, при необходимости давать лишь гипотетические ответы на подобные вопросы, имела бы для систематики далеко идущие последствия. Естественно, что это отнюдь не означает, что этой проблемой не следует заниматься. Кажется вполне вероятным, что в зависимости от геолого-тектонических условий ранее инертные части земной коры могут становиться мобильными, активными магмами. Каковым было первоначальное состояние этой части земной коры, мы не знаем. Однако можно думать, что она при известных обстоятельствах имела «твердую» консистенцию. Если бы она была медленно превращена из кристаллического

<sup>1</sup> F. Drescher-Kaden. Über Assimilationsvorgänge, Migmatitbildungen und ihre Bedeutungen bei der Entstehung der Magmen, nebst einigen grundsätzlichen Erwägungen, *Chemie der Erde*, 10, 271, 1936.

состояния в расплавленно жидкое, причем образовавшиеся вначале частичные расплавы (Teilschmelze) были отжаты в виде отдельных магм или вследствие значительной разницы все поднялись бы кверху, то этот процесс рассматривался бы только как выдавливание остаточного расплава начавшей кристаллизоваться магмой. Этот процесс представлял бы, таким образом, часть процесса комплексной гравитационной кристаллизационной дифференциации и ни в коем случае не находился бы в противоречии с ней. Только, если утверждать, что некоторые магмы, как, например, гранитные, должны были образоваться при полном или частичном переплавлении совсем других пород, таких, как основные и средние, и, следовательно, все многообразие пород было бы *предопределенным*, можно было бы применять теорию нормальной дифференциации.

Имелись различные предположения, которые приписывали большую роль периодическим процессам переплавления, особенно первичных осадочных пород, чем это принимается метаморфистами, которым известны отдельные процессы подобного рода. До тех пор, пока нам не будет известно что-либо определенное о «тепловом режиме» земли, все эти процессы остаются в области гипотетических предположений.

Выводы Ф. Дрешер-Кадена (цит. статья, стр. 289) не убедительны, так как многие тектонические наблюдения говорят в пользу положения П. Эскола: «Оболочка сiala постепенно утолщалась в течение геологического времени и увеличивается в настоящее время». Дрешер-Каден пишет: «Если не захотят предположить даже это последнее (то, что осадочный материал участвует в создании изверженных пород) и будут рассматривать все массы глубинных пород, включая инъцированные гнейсы и весь привнесенный сюда инъцированный материал, как ювенильный, то придется учесть, что в результате продолжающихся, начиная с архея, интрузий, верхние части земной коры должны были бы подвергнуться разбуханию, в силу чего произошло бы невообразимое утолщение верхней части земной коры». И дальше: «Верхняя часть земной коры не может быть утолщена, не компенсируя поднимающиеся кверху массы опусканием других, из более высоких горизонтов, и переплавлением их». Или на стр. 302: «Однако вообще существование таких гигантских, внутрикоровых магматических очагов, на которых, например, могло бы быть основано образование кристаллического фундамента наших континентов, . . . Мало вероятно».

Следует обратить внимание на то, что по тем геофизическим данным, которыми мы располагаем, подобное увеличение активности или даже переплавления (даже если

оно вызвано весом лежащих выше пород) должно иметь место нормально снизу вверх. Даже если в более высоких горизонтах располагаются гнейсы и граниты, а на глубине — основные породы, то температура плавления гранита будет относительно высокой, так как она не идентична с температурой кристаллизации богатой водой гранитной магмы. Если же в эти массы проникнут снизу в большом количестве пары (понижающие температуру плавления), то это является указанием, что там, в глубине, наступила активность.

Противником взглядов, придающих большое значение переплавлению кристаллической оболочки (сиаля), выступил П. Эскола<sup>1</sup>. Вместе с Боуэном он утверждает необходимость привноса очень большого количества тепла, однако признает вместе с нами возможным частичное образование растворов — «выпотов» (Ausbluten).

Итак, очень многие явления говорят за то, что на той глубине, где впервые выделяется активная магма, имеется налицо основная, базальтовая магма. Достаточно вспомнить об изменениях платобазальтов и о поднятии подобных магм к началу всякого орогенеза, связанного с магматической активностью. Поэтому само собой возникает вопрос: не могли ли из этой, часто называемой неправильно «сима», первоначальной магмы возникнуть другие магмы не только путем дифференциации. То, что они все связаны друг с другом переходами, доказано геолого-петрографическими наблюдениями, а также химическими и минералогическими исследованиями. Расплавление вышележащей оболочки сиаля, которое возникает после увеличения активности «симы», имело бы, вообще говоря, не более двух эффектов:

1) Оно могло дать определенное направление дифференциации путем изменения первоначальной магмы.

2) Оно привело бы к образованию ультраметаморфических пород в области магматического контакта и в зоне повышенного обмена автохтонными растворами.

Но нигде химические отношения не свидетельствуют в пользу того, что основные магмы появляются в резуль-

<sup>1</sup> P. Escola, On the origin of granitic magmas, *Min. Petr. Mitt.*, 42, 455, 1932.

тате магматической активности си́мы, а кислые имеют происхождение из си́аля.

б) *Связь гранита и гнейса*<sup>1</sup>. Для поддержки гипотезы о литогенно-си́алическом происхождении гранитных магм часто указывают на уже упоминавшуюся в предыдущих главах тесную связь между гранитами, инъекциями и гнейсами.

Наряду с Ф. Дрешер-Каденом (цит. работа) можно указать работу О. Г. Эрдмансдерфера<sup>2</sup>. Вполне понятно, что эти переходы могут толковаться двояко: близость гранитной магмы создает благоприятные условия для ультраметаморфизма или сама гранитная магма является конечным продуктом ультраметаморфизма. Ни один из приведенных Дрешер-Каденом или Эрдмансдерфером

<sup>1</sup> Необходимо указать на примитивное представление о проблеме гранита-гнейса у Баклунда (H. G. Backlund, Die ältesten Baueinheiten von Fennoskandia. Ein Beitrag zur Leitung des Urgebirges, *Mitt. der Naturf. Gesellschaft Schaffhausen*, 17, 31, 1941) для области, которая, согласно самому автору, испытала неоднократные периоды орогенеза, связанные с метаморфизмом пород. Здесь, кроме всего прочего, бросается в глаза расширение понятия (стр. 52, 53): «Кроме тектурных особенностей, которые склонны обнаруживать породы, возникшие путем метасоматоза, вызывает прежде всего интерес параллельное расположение минеральных компонентов в сменяющих друг друга дискообразных или линзообразных телах». При дальнейшем расширении этих представлений можно ожидать, что каждая *отраженная текстура* (тектонического или осадочного происхождения), каждая полосчатость является доказательством метасоматоза. Не оставалось бы ничего другого, как называть метасоматозом всякий вынос или обмен вещества внутри системы, в то время как до сих пор для этого понятия считался характерным привнос вещества к горной породе. «Внутренний метасоматоз», который связан с каждой химической реакцией, протекающей внутри породы, не является типичным, если говорить о метаморфизме с «внешним» метасоматозом: при этом должны быть отнесены к «метасоматическим» породам не только каждая кристаллобластическая метаморфическая порода, но и каждая магматическая порода, так как в интерстициях (*Teilträumen*) тех и других происходит изменение вещества. Естественно, остается неприемлемым, чтобы этот внутренний обмен веществ, связанный с замещениями и кристаллобластезом, относился к метаморфическим процессам в широком смысле слова. Но если порода обозначается как метасоматическо-метаморфическая, то поступившие извне растворы должны изменить химический состав породы.

<sup>2</sup> О. Н. Erdmannsdörffer, Studien in Gneisgebirge des Schwarzwaldes II, Die Rolle der Anatexis, Sitz. Ber. Heidelberger, *Acad. Wiss. Abh. math. nat. Kl.*

аргументов (структурные переходы, явления конвергенции и т. д.)<sup>1</sup> не говорит против первого предположения, которое принимает во внимание также «выпоты», возникающие (П. Холмквист, Т. Ф. Барт) при повышении температуры и имбибии, но не доходят до утверждения, что «породы были переварены в собственном соку». Против этого, однако, говорит многое. Во-первых, уже П. Эскола (цит. работа, стр. 460) обратил внимание на следующее: «В архейских гранитных массах следы движения, например параллельная и линейная текстуры, преимущественно направлены вверх, доказывая, что магма двигалась в этом направлении». В каком масштабе происходило это дифференциальное движение вверх, конечно, трудно установить; во всех случаях наличие его не является доказательством автохтонного происхождения магмы. В молодых, слабо метаморфизованных горных цепях эта интрузия ясно выражена, инъекция, частичная ассимиляция и пневматолиз часто еще хорошо распознаваемы, однако возникновение такой гранитной магмы путем простого переплавления пород, сопровождающих интрузию, в настоящее время, полностью исключено. Так, Дрешер-Каден (цит. работа, стр. 300) пишет: «Каждый молодой гранит залегает как чуждый данному месту расплав, уже совсем не рядом со своей первичной боковой породой. Поэтому химические связи с собственно исходным материалом могут быть установлены лишь для гранитов, которые коренятся в областях развития гнейсов». Но в герцинских и более молодых горных цепях видно, что гранитные магмы претерпели перемещение, поднимаясь снизу, и наверняка не возникли на этом самом месте; и становится непонятным, почему этого не могло быть в известной мере при более ранних горообразованиях. Проблема завоевания пространства молодыми гранитными расплавами должна быть так или иначе разрешена, а аналогия в минералогическом составе полиметаморфических гнейсово-сланцевых пород с гранитом не нуждается в поисках совершенно другого генезиса.

<sup>1</sup> Очень часто упускают из вида, что последующий метаморфизм сглаживает первоначально ясные различия между магматическими и метаморфическими структурами. Это хорошо известно каждому геологу, работавшему в Альпах.

К этому непременно следует добавить, что в областях архайд возможно глубокое ознакомление со строением земной коры, однако и там оно не достигает глубин, определяющих область симы. Следовательно, в этом объяснении еще имеется возможность предположить образование гранитной магмы путем дифференциации основной магмы, бывшей когда-то активной в этих областях. Определенным остается только то, что палингенные граниты предполагают наличие ранее образованных гранитов; следовательно, полное разрешение проблемы этим путем не может быть успешным, и поэтому принимают теорию гранитизации, осуществляющейся путем привноса вещества. Химические условия допускают, конечно, установление переходов от пневматолитически измененных гнейсов, через интрузивные гнейсы к гранитам. Однако подобного рода диаграммы часто имеют однозначный характер.

Гнейсы этой зоны в противоположность гранитам являются паракристаллически-метаморфическими породами с вполне определенным фенотипом, и надо согласиться с Х. Зенгом, что структурные картины спорного происхождения являются относительно редким исключением. Перемещение веществ может привести к сходству с магматическими структурами, даже если метаморфизм происходит в основном в твердом состоянии. Это говорит во многих случаях против необходимости признания широкого развития явлений переплавления, а также против широкого распространения литогенного образования магмы. Подобные наблюдения никогда не могут привести к тому, чтобы вообще отрицать магму и утверждать, что породы, обладающие ясно магматической группой признаков, являются всего навсего метаморфическими.

Таким образом удается установить, что парагенезис гранит-гнейс, образование мигматитов и наблюдаемый анатексис не представляют решения проблемы о происхождении гранитной магмы в целом. Из этих неоспоримых фактов ни в коем случае не следует, что большая часть или по крайней мере значительная часть настоящих гранитных пород представляет переплавленный сиаль, в противоположность другим изверженным породам.

в) *Коренное двухчленное деление магм на кислые и основные.* Об этом уже упоминалось выше. Сторонники того взгляда, что молодые граниты представляют генетически нечто принципиально отличное от более древних гранитов, утверждают, что между обоими типами существует разница в химическом составе. В большинстве случаев это, повидимому, основано на заблуждении. Под словом «гранитный» понимается в обиходе большая серия магм и пород, вариации внутри которой иногда бывают довольно значительные. Так как то же самое относится и к основным и к средним породам и, поскольку

существуют переходные члены, это деление на две крайние магмы является более или менее произвольным. При исследовании молодых американских горных цепей появилась потребность более детального расчленения между различными глубинными гранитными породами, были выделены кварцевые монзониты, гранодиориты, обычные граниты и т. д. Это, казалось, означало противоречие с кислыми глубинными породами Европы, известными преимущественно из древних горных цепей и называвшимися просто гранитами. В действительности химическое исследование установило, что все найденные в Кордильерах типы уже представлены среди древних и древнейших «гранитов», а в некоторых частях южной Африки выступают как древние магматические породы крайние гранодиоритовые и кварцеводиоритовые породы.

Склонность рассматривать кислую магму как нечто особенное имеет, как уже ранее упоминалось, свое основание в оценке количественных отношений различных изверженных пород. Наблюдаемые факты говорят о том, что в более древних участках земной коры граниты в широком смысле слова встречаются чаще. Так, многие исследователи сходятся на том, что многие явления в основных породах не могут быть интерпретированы иначе, как таким образом, что при застывании основной магмы остаются гранитоподобные остаточные расплавы. Возможность возникновения гранитных расплавов путем дифференциации вовсе не оспаривается, но подчеркивается, что количество возникающих таким образом кислых пород должно быть так незначительно, что едва ли может быть речь о подобном процессе для больших масс гранитных магм<sup>1</sup>. Это было одним из возражений А. Холмса, которое привело его к теории образования гранита путем переплавления сиала.

Я думаю, будет достаточно процитировать в качестве возражения следующую выдержку из работы П. Эскола (цит. работа, стр. 469): «Весьма вероятно, что базальты и сима, если она имеет тот же состав, что и базальты, содержат только небольшое количество элементов гранита, однако достаточное для того, чтобы образовать определенное количество низкоплавкой магмы, которая может

<sup>1</sup> Даже Т. Ф. Барт придает большое значение количественным соотношениям.

быть выделена, если порода способна выжиматься. Как ни мало это количество, мы должны считать, что количество симы под сиалем настолько велико, а массы симы, мобилизованные в каждой геосинклинали во время орогенного цикла, должны быть так значительны, что могли привести к образованию гранитов в большом масштабе».

Прочие относящиеся сюда вычисления находятся в одной из работ автора<sup>1</sup>.

При подобных возражениях всегда забывали о наблюдаемом количестве пород; теория магматической дифференциации должна переносить главный процесс дифференциации от основных пород к кислым на глубину, так как необходимо учитывать, что однажды возникшая гранитная магма вследствие своего удельного веса и своей активности, обусловленной наличием в ней легколетучих компонентов, должна подниматься кверху при движениях, происходящих в земной коре. Это не бегство в неисследованные дебри, но только логические рассуждения. Гранитная магма должна перемещаться в орогене, и места ее образования и ее окончательного затвердения редко будут совпадать.

Представление о выдавливании остаточных гранитных расплавов особенно хорошо выражено у П. Эскола. Он пишет в своей уже цитированной работе: «Я все больше и больше присоединяюсь к идее о том, что гранитная магма должна была образоваться главным образом в связи с орогеническими движениями, путем отпрессовывания или выжимания низкоплавкого материала, частью из более основных пород, не вполне еще затвердевших, и частью из пород, частично расплавленных в глубоких областях геосинклиналей...» (стр. 456). «Изложенный выше вывод показывает, что последний остаток в платобазальтах и образовавшиеся последними минералы, так же как и пегматитовые сегрегации, должны быть тем материалом, который приводит к образованию гранитов и вообще должен быть выжат из материала платобазальтов» (стр. 463).

П. Эскола (и Т. Ф. Барт в работе «Die Entstehung der Gesteine», изданной К. В. Корренсом, Берлин, 1939) предполагает, что верхняя половина основной оболочки симы является только частично жидкой и что расплав,

<sup>1</sup> P. Niggli, *Schweiz. min. petr. Mitt.*, 15, 153, 1935.

находящийся в порах, в промежутках между частицами пород, как палингенная остаточная масса обладает гранитным характером. Она и, возможно, аналогично ей образованные «поровые расплавы» («пот») осадочных пород выдавливаются в орогенически подвижных участках и соединяются в мощные магматические массы, которые поднимаются кверху. Если они возникают только (или преимущественно) из той же «симы», которая является источником совершенно жидкой базальтовой магмы, то это ни в коей мере не противоречит теории гравитационной кристаллизационной дифференциации. Это является до известной степени обратной стороной той же теории; теория дифференциации принимает во внимание как погружение кристалликов, отставание остаточных расплавов, их выдавливание, так и поднятие последних или первоначальных палингенных расплавленных частей. Здесь не место высказывать предположение о литогенном образовании гранита в противоположность ювенильному, так как то, что образуется из первоначально недифференцированной области, которую мы рассматриваем как источник магмы, должно быть названо ювенильным; для нас невозможно установить, каково было ее агрегатное состояние в определенные геологические времена. Термин «литогенный» должен остаться для тех типов магмообразования, которые предполагают вторичное переплавление пород, представлявших продукты осадочного или магматического циклов развития. Так как необходимо принять во внимание представление Эскола<sup>1</sup>, то надо обратить внимание на следующее. До периода гранитной интрузии основная магма движется кверху. Полностью жидкие массы уже способны к интрузии даже в тектонически относительно спокойное время. Однако из этого нельзя заключить, что над ними лежат мощные, только позднее становящиеся частично жидкими слои уже затвердевших основных изверженных пород. Скорее надо предполо-

---

<sup>1</sup> В отношении вопроса о количественных взаимоотношениях, конечно, ничего не будет изменено. Количество гранитного «пота» из массы базальтовых пород не может быть большим, чем количество гранитного остаточного расплава из базальтовых магм; наибольшее увеличение может возникнуть вследствие смешения выпотов из пород с оболочкой сналя, что аналогично процессам ассимиляции.

жить, что подвижные с самого начала массы «симы» начали застывать, а из магматической каши начали выжиматься остаточные расплавы и отсаживаться продукты кристаллизации.

Против действительности последнего принципа часто выдвигается то, что на месте застывания магмы сегрегации кристаллов наблюдаются только в исключительных случаях. Точно так же пишет П. Эскола (цит. работа, стр. 459): «Еще более удивляет недостаток отсадки кристаллов в архейских формациях, которые вообще должны быть отнесены к корням горных цепей». Однако эти корни лежат не так глубоко, чтобы нельзя было фиксировать подъем магмы до затвердения. Если даже гранитная магма и возникает благодаря комплексной кристаллизационной дифференциации, то она будет находиться в состоянии насыщения. Если она продолжает подниматься дальше, в течение периода крупных тектонических движений, то, вследствие понижения температуры и отдачи газов, следует ускоренное ее охлаждение; таким образом для дальнейшей кристаллизационной дифференциации остается место (и время) только в самых внутренних ее частях. Здесь, во внутренних частях, эта дифференциация также имеет место и ведет к последующему внедрению аплитов и лампрофиоров. Совершенно неразумно поэтому требовать, чтобы продукты гранитной магмы рассматривались как кристаллизационный процесс, который приводит к гранитной магме.

Таким образом, оказывается вполне возможным, что гранитные магмы вследствие гравитационной кристаллизационной дифференциации образовались на глубине прежде, чем принять участие в процессах дислокации, т. е. интродировали в фазу интенсивного орогенеза. Для подобного процесса является однако необходимым большой промежуток времени относительного покоя, который приводил бы к образованию мощного гранитного верхнего слоя. Это и является как раз нормальным ходом событий в орогене. Интрузия гранитной магмы следует в син- и посторогенный период, после окончания длинного периода относительного покоя интрузий и экструзий, как в раннюю фазу орогенической деятельности. В промежуточное время внедрившаяся перед этим основная магма

остывала очень медленно вследствие увеличения имеющейся в геосинклиналях кровли. Имелось время для того, чтобы путем комплексной гравитационной дифференциации образовалась слоистая магматическая масса, покрытая гранитной пеной.

Достоинно внимания то, что это правило, находящееся в полной гармонии с учением о дифференциации, дало повод к возражениям против этой же теории. Лучше всего это выражено в работе Х. Штилле<sup>1</sup>.

Он пишет, например, на стр. 263: «Представление о том, что кислые магмы современных гор имеют литогенное происхождение, находит большое подтверждение в Североамериканских Кордильерах, в которых наблюдается в период орогенеза «внезапное» появление огромных масс гранитного материала в областях, где до этого господствовал вулканизм преимущественно основного характера».

Ниже: «Литогенная теория образования магмы предполагает опускание замков складок (Faltungswülste) наряду с соответственно интенсивной складчатостью. Это положение действительно по меньшей мере для первого крупного плутонического акта определенной эры, в то время как при последующих актах имело место, вероятно, более глубокое погружение сиэля и поэтому требовались только незначительные повторные опускания для возобновления маглообразования».

Непонятно, как гипотеза литогенного образования (переплавления уже имевшихся пород) должна сделать более понятным внезапность появления гранитных магм<sup>2</sup>. Именно подобный процесс расплавления должен был протекать очень медленно, и так как породы, о которых идет речь, вовсе не обладают гранитным составом, то должны были бы встречаться промежуточные продукты, не обладающие нормальным магматическим составом. Штилле сознает, что многое в Североамериканских Кордильерах говорит против этого автохтонного образования магмы в средне- или позднеорогенное время и прибегает поэтому к<sup>3</sup> довольно странным вспомогательным средствам. В промежутках времени должны были внедряться симические (гипогенные) и литогенные магмы.

<sup>1</sup> H. Stille, «Einführung in den Bau Amerikas», Berlin, 1940.

<sup>2</sup> Для образования гранодиоритовой магмы путем дифференциации имеется время между началом магматизма и кульминационным пунктом орогенеза, для переплавления вследствие погружения складок — только время собственно главной складчатости. Возможно, однако, что именно вследствие пароксизмов в процессе складкообразования при погружении складок уже возникшая в глубине гранитная магма «внезапно» выжимается кверху, в то время как последовательное сплавление в процессе складчатости заставляет ожидать среди интрузирующих продуктов переплавления самые различные составы между осадочными образованиями, гнейсами и нормальными магмами, поскольку каждое подобное более или менее спокойно протекающее сплавление приводит к подъему магмы,

«Приходит мысль, что поскольку основные породы не являются дифференциатами литогенных магм, в такие промежуточные периоды сиаль находился своими глубинными частями почти на границе своей плавкости, так что уже относительно небольшие поднятия и опускания земной коры или изменения положений геоизотерм были достаточными, чтобы привести к его затвердеванию или к возобновлению его активности. Но если сиаль был затвердевшим, то для внедрения могли быть пригодными только основные гипогенные магмы, в то время как при повторном расплавлении они в первую очередь поднимались кверху, как наиболее верхняя часть общего запаса магм» (стр. 267).

Эта предполагаемая слоистость магм могла бы быть гораздо легче объяснена как слоистость дифференциации, особенно если принять во внимание огромное изобилие андезитовых и средних лав. Она не имеет ничего общего с гипотезой литогенного образования гранита. По Штилле, менее интенсивная складчатость, сравнимая с невадийской, должна быть практически свободной от синорогенного плутонизма, так как погружение складок сиалья не достигало зоны расплавления. В США, по направлению на восток, плутонизм выходит далеко из рамок альпийской складчатости, переходит в германотипную структуру основания.

«При этом говорится о магмах, которые являются подобными или, по меньшей мере, связанными кровным родством с магмами западных областей» (стр. 264).

Вместо того, чтобы из этого сделать вывод, что предположение о литогенном образовании гранита путем впавления глубинных складок сиалья себя не оправдало, Штилле продолжает:

«С точки зрения литогенного понимания образования сиалических изверженных пород создается представление, что гранитные массы Скалистых гор, так же как и сопровождающие их сиалические вулканы, не были образованы на месте, а пришли с Запада. Уже при взгляде на плутон Боулдер (Boulder-Pluton) и весьма германотипную структуру его основания едва ли можно предположить его автохтонное происхождение, в то время как находящийся недалеко и, что самое главное, считающийся более древним плутон Айдахо все же должен был бы рассматриваться как автохтонный и, вероятно, невадийско-автохтонный» (стр. 264).

Гранитная магма должна, таким образом, в известных местах иметь автохтонное происхождение благодаря расплавлению сиалья. Но так как магма встречается кроме того во многих местах и частью в таких образованиях, где геолого-тектонически подобное возникновение никак нельзя объяснить, то там, где она «не на месте», она считается аллохтонной, прошедшей длинный путь, прежде чем занять существующее положение.

«Восточные проявления аллохтонных интрузий находятся в Блэк-Хиллс, Дакота. Магматические истоки должны были, таким образом, пройти многие сотни километров» (стр. 264). «При своем движении на восток магмы, как думает Линдгрэн, дифференцировались от магмы диоритовых и гранодиоритовых пород, которым уже предшествовали дифференциаты основной магмы, до монцонитов и кварцевых монцони-

тов и, наконец, около восточной границы их распространения до пород с отчетливым преобладанием щелочей».

Против передвижения магмы и подкорковых магматических потоков (*Unterströmungen*) нечего возразить, но тогда они были бы заметны, так же и в областях альпинотипной складчатости. Впрочем, теория дифференциации, согласно последней приведенной выдержке из Штилле, снова находит свое применение, однако непонятно, почему она не используется для объяснения происхождения пород батолита Берегового хребта, местами варьирующих от основных до кислых. «Внезапное» появление кислой магмы очень хорошо согласуется с теорией дифференциации, тем более, что условия «внезапности» соблюдались не очень строго, так как у кислой магмы были предшественники от основных до средних составов.

Ни одно из приведенных Штилле доказательств не говорит против дифференциационной теории и в то же время за литогенное образование магм; это *предполагается*, но не выставляется как вероятное. Из построенных профилей, впрочем, вовсе не видно, чтобы необходимость такого гигантского расплавления вытекала как следствие из погружения складок; кроме того, профили часто не отражают протекавшие в различное время фазы и одновременно возникающую эрозию.

Мы должны быть очень обязаны Штилле, что в этом важном геолого-тектоническом труде он сопоставил различные определения. Некоторые из них мы приводим, так как они лучше всего выражают его взгляды.

*Мигматизация.* Изменение различных пород поднимающимися горячими растворами и расплавами. «Мигматиты» имеют большую часть гранитный состав, и поэтому понятия «мигматизация» и «гранитизация» широко перекрывают друг друга.

*Косвенное палингенное воздействие орогенеза.* Расплавление таких частей замков складок (*Faltenwülste*), которые достигают зоны плавления не в начале орогенеза, а несколько позднее. Однако предшествующим орогенезом они были сильно сближены с этой зоной.

*Палингенез.* Новообразования магм путем переплавления пород.

*Непосредственное палингенное воздействие орогенеза.* Переплавление масс пород (область переплавления погружающихся на глубину складок) во время или непосредственно после орогенеза.

*Гипогенные магмы.* Глубинные магмы базальтового или даже перидитового типа и их, частью сиалевые, продукты дифференциации. Противоположность — палингенные («литогенные») магмы.

Отсюда видно, что Штилле исходит из того, что образование магм есть следствие орогенеза. Штилле не доказывает, что это происходит именно таким путем, и из его высказываний никоим образом нельзя заключить, что это предположение лучше объясняет наблюдаемые отношения, чем гипотеза, которая подобные явления расценивает как вторичные. Надо однако предостеречь от того, чтобы на основе представлений, которые возникают из совсем другого круга идей, выдвигались кажущиеся обоснования для определенных петрологических рабочих направлений, которые при ближайшем рассмотрении таковыми вовсе не являются или не могут являться по самой

природе вещей. Идеи Штилле должны бы подвергаться дискуссии совсем в другом пункте, а именно — при рассмотрении вопроса, как относятся друг к другу *тектоника коры* и *тектоника магмы* и как складывается *тепловой режим земли*.

Вполне можно себе представить, что тщательно обоснованные геофизические и геолого-тектонические соображения для определенных орогенических областей приводят к тому, что значительное погружение складок или существование так называемых зон поглощения кажется вполне вероятным. Вопрос о том, действительно ли подобные процессы ведут к широкому новообразованию магм, нуждается еще в проверке. Повидимому, в некоторых горных областях, почти одновременно с «образованием корневой зоны», была внедрена уже имеющаяся магма, так что произошел как бы обмен местами. Эта интродуцированная, частью гранитная, до гранодиоритовой, магма обладала иногда незначительной, а часто ярко выраженной ассимиляционной способностью (например в Бергелле) и стала при этом более основной (контаминированная порода). Геолог, который хочет доказать, что процесс погружения складок на глубину может привести к образованию магмы в крупном масштабе, должен сопоставить все необходимые для этого аргументы и, само собой разумеется, должен отказаться от предположения, что гранитная магма имеет литогенное сиалическое происхождение.

Впрочем, становится более ясным, что имеется скорее всего тенденция переоценивать возникающую при складчатости суммарную мощность пород, так как в суммарном профиле не может быть отражена вся история возникновения пород. К тому же не следует забывать, что первоначально вновь возродившейся теорией о литогенном происхождении гранитных магм (А. Холмс) за образец был взят Центральный комплекс Англии, следовательно, не типичный ороген. Наряду с этим есть совершенно различные причины, которые вновь вызвали к жизни гипотезу двойственности магмы, и часто отдельные аргументы не только не поддерживают, но и противоречат друг другу. Петрохимия и учение о магматических провинциях ее не могут до сих пор дать веских аргументов в пользу сторонников литогенного происхо-

ждения гранитов; вся ответственность лежит, таким образом, целиком на плечах геологов и тектонистов. Они должны, со своей стороны, так же убедительно и хорошо объяснить многочисленные закономерности, которые характеризуют магматические серии пород, как это объясняет теория дифференциации. Только тогда их взгляды найдут себе применение в петрологии в качестве пригодной рабочей гипотезы.

Надо вполне согласиться с тем, что именно в геологии часто приходится работать с гипотезами, которые вначале кажутся непонятными с физической и физико-химической точки зрения и которые все же должны выдвигаться, так как другие взгляды находятся в противоречии с наблюдаемыми фактами. Возможно, что многие сторонники литогенного происхождения гранитной магмы предполагают, что именно так обстоит дело в данном случае. Однако все возражения, выдвинутые по сегодняшний день против теории дифференциации, несомннительны, таким образом, следовательно, должна иметь место новая и тщательная проверка. Дифференциационная теория со своей стороны будет подвергаться дальнейшей разработке; мы поступим правильно, принимая во внимание явления ассимиляции и пытаюсь ясно установить, в каких случаях последняя не оказывает влияния на ход дифференциации. Нельзя удовлетвориться общей фразой, что гранит может быть образован путем дифференциации из базальтовой магмы, так как в большинстве случаев магма образуется другим путем. Было бы весьма замечательно, если бы внутри какого-нибудь геологического комплекса можно было бы различить литогенное и ювенильное образование гранитных магм. За разрешение этого вопроса должны энергично взяться обе стороны, используя все имеющиеся вспомогательные средства современной петрографии и физической химии.

г) *Химические и минералогические признаки серий.* Комплексная гравитационно-кристаллизационная дифференциация рассматривается петрологами как нечто само собой разумеющееся, так как она является единственной среди всех гипотез, которая без сомнения позволяет вывести из нее множество правил, вытекающих из наблюдаемых ассоциаций магматических пород. Так, например,

нормальная последовательность интрузий в орогене: основная, кислая и под конец часто снова основная; далее, образование вторичных дифференциационных рядов внутри главных, так как должна приниматься во внимание способность к дифференциации, присущая каждой магме и увеличивающаяся при больших частичных интрузиях и очень медленном охлаждении; далее следует развитие аплитов и лампрофиров, т. е. образование так называемой жильной серии какой-либо глубинной породы. Названные гипотезы позволяют понять, почему в течение длительного промежутка времени могли существовать рядом магмы различного состава, которые могли произойти или непосредственно из одной основной родоначальной магмы, или путем вторичной дифференциации. С другой стороны, она объясняет закономерность последовательности магм и отступления от этого правила ее средних членов, поскольку последние не содержатся ни в частичных интрузиях, ни в экструзиях. Там, где встречаются большие массы магм, они должны принадлежать к начальным или конечным стадиям; дифференциация или еще не началась, или уже закончилась<sup>1</sup>. Она является

---

<sup>1</sup> Надо подчеркнуть, что все аргументы, выдвигаемые против дифференциационной теории образования гранитовой магмы, в действительности говорят в пользу этой же теории.

Среди излившихся пород как будто сильно преобладают породы габброидно-базальтового состава, среди глубинных пород — породы гранодиоритово-гранитового состава. Если процесс дифференциации для гранитной магмы является всеобъемлющим процессом для природной большой, медленно остывающей магматической массы, то этот процесс и будет иметь место, а в основном магма может получиться только при очень быстром охлаждении (экструзии, небольшие интрузии, поверхностные интрузии). Учение о магматической кристаллизационной дифференциации именно и требует наблюдаемого закономерного распределения кислых и основных магм среди вулканических и плутонических пород. Она не нуждается для этого в дополнительной гипотезе.

Тот факт, что во вскрытых эрозией глубоких частях древних горных цепей находят граниты, ни в коем случае не стоит в противоречии с географически обоснованным взглядом, что на глубине находятся основные породы. Переоценена лишь, как и в Альпах, величина эрозионного среза в этих участках земной коры. Для того чтобы получить представление об областях, которые когда-то были на 50 и больше километров глубже поверхности земли, производились неоднократные вычисления. Однако нам нигде не удалось хоть

единственной рабочей гипотезой, которая делает понятным широко развитое и давно уже используемое в систематике правило минеральных парагенезисов в изверженных породах, например преобладание бедных кальцием, богатых щелочами полевых шпатов при наличии больших количеств кварца; последовательно возрастающее значение биотита по сравнению с роговой обманкой и авгитом в ацидитах, сосредоточение редких элементов в остаточных растворах сиенитовых и гранитных магм, развитие рудных месторождений и т. д.<sup>1</sup>

на момент взглянуть на такую глубину, даже в «область симы». Геология, исходя из непосредственных наблюдений, может заниматься только корой, эпидермой, земного шара.

<sup>1</sup> По вопросу — является ли магма литогенным образованием и представляет ли гранит метасоматически-метаморфическую породу, находим дискуссию в статье *Granit und Erzlagerstätten*, *Econ. Geol.*, 36, 1941 (A. Locks, 448; H. E. Ms. Kinstry, 829). Мак Кинстри пишет: «Предполагается, что гранитизация требует воздействия, возможно, тепла, возможно, водных растворов и, несомненно, источником этих факторов является магма; если не видно магмы — источником их получения является предполагаемая и расположенная на глубине магма региональных размеров.

Я охотно допускаю, что предположение о существовании такой магмы — вещь совершенно иная, чем доказательство ее существования, однако ее наличие, скорее чем отсутствие, подразумевается теорией, признающей метаморфное происхождение гранита. Поиски местного источника металлов многообещающи, но нельзя терять из вида действительности, «абиссального источника» рудных растворов, даже если бы преобладающие компоненты гранита были бы местного происхождения».

Мак Кинстри смог, таким образом, отнести образование рудных месторождений, тесно связанных с образованием гранитов, к расположенной на глубине магме, которая в то же время является источником гранитизации. Вместе с тем, однако, возникает вопрос, не является ли гранит (в соответствии с его структурой) нормальной магматической породой? Если не сомневаться в магматическом, возможном только путем дифференциации, происхождении рудных растворов, то еще менее приходится сомневаться в отношении пегматитовых образований, которые, со своей стороны, переходят в нормальный гранит. Так одно обуславливает другое. Предположение, что гранит возник путем переплавления осадочных пород или представляет собой метасоматически-метаморфизованную породу, усложняет отношения; предположения были бы оправданы, если бы имелись веские доказательства, которых в настоящее время нет. Известные до сих пор «гранитные породы» метаморфического происхождения резко отличимы от «настоящих» гранитов. Попытка X. Г. Баклунда (H. G. Baklund, *Mitt. d. Naturf., Gesellschaft Schafft-*

В соответствии с наблюдаемыми фактами гетероморфизма изверженных пород, объясняющими зависимость образования кристаллов от внешних физических условий и от содержания летучих компонентов, эта теория должна требовать наличия различных направлений дифференциации магмы, которые в общем выводятся из законов кристаллизации расплавов. Это действительно имеет место. Вариации распознаются как в малом, так и в большом масштабе. Как было указано в работе автора<sup>1</sup>, как раз образование рядов (тихоокеанский — атлантический — средиземноморский) является следствием возможных смещений путей кристаллизации и т. д.

Однако часто делались попытки вскрыть небольшие противоречия. В значительной мере подобные высказывания относятся к простой гравитационной кристаллизационной дифференциации, выдающимся защитником которой является Н. Л. Боуэн. Вычитая из состава магмы только состав отсевших кристаллов, не принимают во внимание ни перемещений выравнивания, ни расплавление кристаллов, ни влияния на ход дифференциации ассимиляции, имеющих подчиненное значение. Мы не будем пытаться установить, принимал ли сам Н. Л. Боуэн участие во всех деталях этого догматического учения, или это ему только приписывается, так как его фундаментальные работы лишь наметили направление. Дело в том, что подобное механистическое истолкование кристаллизационной дифференциации непригодно для понимания имеющегося в природе разнообразия пород. Оно приводится

---

*hausen, 17, 61, 1941)*, связать процессы рудообразования и гранитизации будет только упомянута. Относительно приведенных в этой работе телемагматических и метасоматических месторождений Восточных Альп сошлемся на специальную литературу. Эти типы месторождений и родственные им образования показывают, между прочим, какое слабое гранитизирующее влияние оказывают поднимающиеся из глубин растворы, приводящие к метасоматозу. Частные эффекты подобного рода, конечно, не укрепляют теорию; гранитизация есть конечный результат всех метасоматических воздействий, как это можно прочесть в указанной статье на стр. 57.

<sup>1</sup> P. Niggli, Die Komplexe Gravitative Kristallisationsdifferention.

здесь не для дискуссии, так как даже расширенное учение ни в коем случае не может с уверенностью исключить явления распада в позднюю фазу дифференциации (при очень повышенной концентрации летучих составных частей).

Необоснованными являются возражения, выдвигаемые на почве некритического перенесения результатов опытов над очень упрощенными сухими расплавами. Физико-химические эксперименты могут нас только ознакомить с основными направлениями протекающих в природе процессов; изучение минералого-химических отношений естественных продуктов должно пополнять наши знания, чтобы предостеречь нас от односторонних взглядов. Если в природе наблюдается возникновение сложных авгитов, роговых обманок и биотита, то ход кристаллизации, получающийся в искусственных расплавах оливина или диопсида, будет в деталях другим.

К. Н. Феннер<sup>1</sup> дал в двух работах на основании подобных возражений материал в руки противников кристаллизационной дифференциации. Его главным возражением было: «Выделение кристаллов, происходящее в базальтовой магме, ведет только к тому, что остаточный расплав становится богаче железом». В среднем отношении  $Fe : Mg'$  передвигается в смысле увеличения содержания  $Fe$  от основных к кислым магмам; существенным является увеличение щелочей и  $SiO_2$  и общее уменьшение двухатомных элементов. Уже П. Эскола выступил против подчеркивания этого кажущегося противоречия, которое на самом деле не существует, поскольку считаются с реальной химической изменчивостью меланократовых составных частей и неизбежными выравнивающими перемещениями.

Недавно появилась интересная работа Л. Г. Вагера и В. А. Дира<sup>2</sup>, в которой описывается кристаллизационная дифференциация базальтовых магм с остаточными растворами, богатыми железом. Как ука-

<sup>1</sup> C. Fenner, The crystallisation of basalts, *Am. Journ., Sc.*, 17, 225, 1929. The residual liquids of crystallizing magma, *Mtn. Mag.*, 539, 1931.

<sup>2</sup> L. G. Wager, W. A. Deer, The Petrology of the Skaergaard Intrusion Kargerdlugssuaq, East Greenland, *Meddelelser om Grønland*, 105, 4, 1939.

зывается подробнее в более поздней подобной же работе, этот процесс является следствием усиленной кристаллизации оливина и особых условий. Точка зрения обоих исследователей, что описанный ими пример является нормальным случаем и развитие гранитной магмы путем только одной кристаллизационной дифференциации невозможно, основывается на неправильном обобщении действительно очень хорошо и подробно исследованного объекта. Выводы Л. Р. Вагера и В. А. Дира (цит. работа, стр. 335) гласят:

«Нормальный ряд известково-щелочных пород часто рассматривается как результат фракционирования кристаллов базальтовой магмы. На основании данных, наблюдаемых в Скаергаардской интрузии, становится ясно, что фракционирование кристаллов базальтовой магмы ведет к образованию феррогаббро, а не к промежуточным породам известково-щелочного ряда. Эти важные данные подкрепляют мнение, что известково-щелочной ряд изверженных пород вообще есть результат смешения основного и кислого материалов. Концепция о наличии конвекционных токов в массе основной магмы, находящейся в контакте с сиалевыми породами, предполагает возможность механического воздействия, посредством которого может эффективно происходить гибридизация между основной магмой и гранитными породами. Смешение основной магмы и гранитных пород, в результате чего получается известково-щелочной ряд, является не менее важным, чем гибридизация кислой магмы и основных пород. Не порфиновый, центральный тип базальта рассматривается как результат гибридизации сланцевых пород коры и богатых железом дифференциатов нормального оливинового габбро. Количество материала ферро-габбро, имеющегося в известной нам части земной коры, невелико; это является дальнейшим указанием на то, что масса посткембрийских гранитов не образована фракционированной кристаллизацией базальтовой магмы». Наряду с этим на стр. 334 имеется фраза: «Основные и кислые гранофиры, образованные во время поздней фазы дифференциации, отчасти являются результатом энергичного фракционирования первоначальной оливин-габбровой магмы в направлении, предполагаемом Боуэном, но при этом они должны были являться частично результатом смешения с кислым гнейсом».

Здесь мы знакомимся с весьма понятным и часто встречающимся в истории развития науки явлением, а именно: с переоценкой действительности значения единичного случая и с игнорированием имеющегося разнообразия. Наблюдаемые вариации в пределах основных магматических групп так велики и меняются настолько непрерывно, что является совершенно недопустимым предполагать повсюду одинаковый состав исходной магмы. Точно так же взгляд У. К. Кеннеди, что достаточно исходить из двух типов магм, из которых каждая по мере необходимости связывается с тем или иным ходом диффе-

ренциации, является недопустимым упрощением и обобщением по существу правильного наблюдения. В деталях мы еще совершенно не знаем явлений кристаллизации, протекающих в магме; мы плохо знаем влияния, которые приводят к гетероморфии или в результате которых в равновесии с магматическим расплавом находится только один определенный член из вариационного поля какого-нибудь рода кристаллов. Имеются еще области, для которых мы пока еще не можем установить закономерностей и видим только результат их действия. На этой стадии недопустимо обобщать отдельные случаи и считать необходимым для этих уклонений немедленное введение дополнительных гипотез. Принимая во внимание все разнообразие вариаций, надо констатировать совпадение их в основных направлениях с теорией, и в дальнейшем необходимо прежде всего расширять наши знания путем экспериментов, наблюдений над природой и точного аналитически-химического исследования пород и минералов. Многие противоречия окажутся при этом закономерностями, многие останутся неясными и требуют действительно дополнительных гипотез.

Конечно, для критического обозрения уже теперь весьма желательно подумать и принять во внимание подобную возможность расширения дифференциационной теории. Против этого нечего возразить, так как весьма вероятно, что мы переоцениваем значение доводов, говорящих в пользу дифференциации. Вредят только поспешные, при ближайшем рассмотрении оказывающиеся необоснованными заключения, исходящие из узкого круга представлений.

О том, что подобные заключения действительно часто встречаются, можно убедиться, указав на работу Р. В. Ван-Беммелена<sup>1</sup>.

Сначала в ней цитируются Вегман, Баклуид, Холмс, Феннер, Риттман, Д. Рейнольдс, Коллинс для обоснования того, что по вопросу о происхождении магматических пород стали необходимыми другие представления, чем обычные. Затем указываются три возможные причины возникновения магм.

1. *Первичные или ювенильные дифференциаты* дифференцирующегося материнского (габброидного) магматического расплава.

<sup>1</sup> R. W. v. Bemmel en, On the origin of the Pacific Magma types in the volcanic inner-area of the Soenda Mountain System, *Der Ingenieur in Niedert. Indie*, 4, I, De Mijningenieur, 1939.

2. *Вторичная или палингенная магма*, возникающая из прежде существовавших пород при мигматизации, под влиянием поднимающихся эманаций, исходящих из неизвестного источника на глубине.

3. *Синтектическая магма* — при гибридизации или контаминации ювенильной или палингенной магм, ассимиляцией прежде существовавших пород.

Таким образом, образование магмы 1-м путем действительно может иметь место, или по частоте образования этот способ стоит после 2-го или 3-го. Это вначале автором не обсуждается.

В последующем течении процесса «магматизм» вообще отклоняется. По Ван-Беммелену, батолит Бенкоенат (Benkoenat), вскрытый на площади 260 кв. км, сложен грубозернистым биотитовым гранитом, который по краям переходит в средне- и мелкозернистый или даже биотитово-роговообманковый гранит. Известны также и еще более основные краевые разности. Это вполне нормальная картина, так же как и то, что от внутреннего ядра, дольше пребывающего в жидком состоянии, отходят апофизы в краевые зоны. Против дифференциации массы *in situ* выдвигаются следующие возражения: «Это объяснение не может дать решения вопроса о том, в течение какого времени происходило затвердевание плутона». Само собой понятно, что эта геотектоническая проблема, которая должна рассматриваться отдельно.

Масса магмы внедрилась в древние, гидротермально-измененные андезиты. В области контакта естественно ожидать эндогенного и экзогенного выравнивания. Ван-Беммелен упоминает о 10 шлифах, взятых из образцов, сохранившихся в одной музейной коллекции, без указания на расстояние от контакта и их точного положения; эти шлифы должны доказать, что имеется непрерывный переход между диоритовой основной фацией и андезитом. Дальше он пишет: «Такие отношения не служат доказательством полного ювенильного происхождения пород». Затем Р. В. Ван-Беммелен рассматривает «интрузии Бантам», которые также частью внедрились в андезиты. Андезиты были при этом частично превращены в амфиболитовые породы, частично метасоматически изменены. По Мусперу, в андезитах встречаются почти неизменные участки осадочных пород, что дало основание Ван-Беммелену написать: «Интрузия андезитов распространилась в осадочной серии «в виде цветной капусты», не раздвигая слои механически в стороны».

На контакте молодого плутона с андезитово-осадочной формацией наблюдаются контактовые явления с обычным проявлением метасоматического воздействия. Все это, казалось бы, легко объяснимо, по Ван-Беммелену, исходя из факта амфиболитизации андезита, заключает, что кварцевые диориты плутона (вызывающие контактовые явления) представляют не что иное, как метаморфизованные андезиты. Андезиты, со своей стороны, произошли из осадочных образований путем метасоматоза, протекавшего в форме «цветной капусты». «Наблюдения ясно подчеркивают возможность того, что по крайней мере часть различных видов изверженных пород тихоокеанского типа не является результатом гравитационной кристаллизационной дифференциации исходной габброидной магмы (Боуэн), но представляет

результат магматизации сиалевых коровых пород поднимающимися эманациями».

Можно было бы повторить приведенные «доказательства», и все же придется только изумляться, что подобные выводы были сделаны из немногочисленных, могущих быть иначе истолкованных наблюдений.

В заключение Ван-Беммелен рассматривает также батолит Мераван (Merawan), вблизи вулкана Раденг (Radeng-Vulkanes). Согласно приложенному профилю речь идет о роговообманковом граните с превосходной контактной зоной на границе с андезитово-осадочной формацией и прекрасно выраженной жильной серией. Описаны роговики, а также продукты краевой ассимиляции. Вполне естественно, что роговообманковые андезиты и роговообманковые граниты обладают сходными минералами, а иногда даже сходной структурой. Этого вполне достаточно для того, чтобы сделать вывод, что роговообманковый гранит является метаморфическим продуктом более высокой степени гранитизации, чем андезит. Но находящийся поблизости вулкан все же изливал лаву, следовательно, должна была существовать магма. Однако это, по автору, только ограниченная камера расплавления (!), в остальном, «согласно приведенным наблюдениям, автор полагает, что, вероятно, это развитие (подразумевается главное направление развития тихоокеанских пород: основные — кислые) представляет не результат кристаллического фракционирования (Боуэн), а является прогрессивным газовым привносом кремния, глинозема и щелочей поднимающимися эманациями».

Вначале еще говорилось о магмах, теперь они уже не нужны.

Подобные геолого-петрографические спекуляции, при пренебрежении элементарными правилами тщательного петрографического наблюдения и исследования, показывают, сколь опасным становится расширение понятий мигматизации и гранитизации в руках «магмотектонистов». Ф. Дрешер-Каден<sup>1</sup>, в противоположность этому, самым тщательным образом исследовал на площади около 1980 кв. км изменения глыб и явления ассимиляции в контакте, известные петрографам из многих гранитных областей. Уже в работе «Chemismus Schweizerischer Gesteine», Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie, 14, Bern, 1939, приводятся многочисленные, выполненные проф. Р. Штауб, анализы изверженных пород, глыб и основных, возникших путем ассимиляции, шлиров.

<sup>1</sup> F. Drescher-Kaden, Beiträge zur Kenntnis der Migmatit und Assimilationsbildungen, sowie der syntektischen Reaktionsformen, I. Über Schollenassimilation und Kristallisationsverlauf im Bergeller Granit, *Chemie der Erde*, 12, 304—417, 1939—1940.

Главный гранит характеризуется следующими молекулярными величинами:

<i>Si</i>	<i>al</i>	<i>fm</i>	<i>c</i>	<i>alk</i>	<i>k</i>	<i>mg</i>	
249	42	12,5	12,5	33	0,51	0,53	Валь-Бондаска
241	36,5	24	15	24,5	0,45	0,51	Область Форно, гранит, повидимому, уже базифицирован (по Дрешер-Кадену)

Диопсидовые граниты и основные краевые фации (соответственно анализам 9, 11, 13, 14, 15, 17 до 21 в «Chemismus Schweizerischer Gesteine», 1930) рассматривались как шпире экзогенных и эндогенных контактовых образований. Ф. Дрешер-Каден подтверждает случаи подобных образований и описывает обычные явления обмена веществ в контакте с включениями. Возникающее вследствие этого увеличение основности выражается в увеличении *fm* и *c* (или одного из двух) и очень хорошо распознается. Он пишет на стр. 408 своей работы:

«Гранит можно рассматривать по отношению к усвоенным краевым породам как самостоятельный и независимый комплекс веществ, получивший свое вещественное оформление в глубоких горизонтах; как уже полностью сформировавшаяся масса, он внедрился затем в более высокие горизонты и при этом захватил ксенолиты из окружавших его пород, «расплавил» их, переварил и изменил, благодаря этому, как свой собственный химизм, так и химизм захваченных им пород. Подобный взгляд является одним и притом довольно односторонним представлением об образовании гранита, так как можно, кроме того, аргументировать и следующим образом. Состояние включенного в гранит в контактной его зоне постороннего материала, который довольно широкой полосой следует на протяжении большей части контактной линии Бергеллерского массива, главным образом на

востоке, севере или юго-западе (ср. Р. Штауб, геологическая карта Val Bregaglia), можно рассматривать по меньшей мере с такой же уверенностью как переходное состояние, которое прошла вся область гранита на первом этапе своего развития. Современное состояние собственно центральных гранитных масс было бы в таком случае только продолжением образования, вплоть до полной переработки включенного материала. Подобное толкование поддерживается целым рядом многочисленных, сохранившихся во внутренних частях массива, шлировых полос и темных образований, которые, как последние свидетели некогда захваченных боковых пород, оказались особенно устойчивыми и поэтому избежали полного поглощения».

Хотя из этих замечаний совершенно ясно, на чьей стороне находятся симпатии автора, следует все же добавить, что контакт глыб еще не дает решения вопроса об образовании гранита. Нам кажется, что именно Бергеллерский массив является прекрасным примером того, что ассимиляция часто приводит к ненормальным составам (необычные магматические типы — см. вышеприведенные анализы), и благодаря подобному включению гнейсов, мергелей, доломитов и известняков гранитная магма становится более *основной*, а не остается неизменной и, тем более, не возникает вследствие этого. Представление о том, что поднялась настоящая кислая магма, которая усвоила значительное количество постороннего материала, лучше всего соответствует всей совокупности наблюдаемых фактов, всесторонне подтверждается тектоническими положениями, прекрасно выраженным несогласием, настоящими жилами, отношением к пегматитовым инъекциям зоны Bellin и, наконец, вулканическими предшественниками, которые в настоящее время представлены туфами среди песчаников Тавейаннац.

д) Гранит как характерная порода тихоокеанской дифференциации. Типично гранитные магмы характерны для тихоокеанской провинции пород, а эти последние характерны для магматической активности в орогене. Это правило со многими исключениями также дало повод рассматривать гранитную магму как нечто особенное. А. Риттман, например, думает, что нормальный ход

дифференциации должен быть базальтово-трахитовым или атлантическим, тихоокеанская дифференциация связана с переплавлением сиала. Подобного рода высказывания полностью укладываются в рамки общей теории дифференциации; в то же время несомненно, что ассимиляция придает дифференциации определенное направление. Подобным же образом может действовать в отдельных случаях вплавление карбонатных пород (Р. А. Дэли, П. Ниггли, А. Риттман).

Здесь необходимо обратить внимание на дальнейшее смещение понятий. В новейших работах часто можно найти тенденцию называть магму, состав которой был изменен благодаря процессам ассимиляции, мигмой. Отсюда следует, что настоящие изверженные породы, которые выкристаллизовались из расплавов, называются мигматическими породами, или мигматитами. Т. Ф. Барт (цит. работа), повидимому, не особенно возражает против этого, если он пишет (стр. 115): «Границы области мигматитовых пород еще не резки». Следующая выдержка взята из работы Рейнгардта: «Мигма, превратившись в магму, может в конце орогенной фазы или даже вне орогена подняться в верхние горизонты земной коры и здесь затвердеть под гидростатическим давлением. Явления дифференциации будут играть тогда существенную роль и дадут повод к образованию различных типов магм. Из остаточных расплавов возникают пегматиты, которые часто сопровождаются редкими металлами, и процесс дифференциации может иметь, как следствие, образование рудных месторождений. Ассимиляция боковых пород часто оказывает сильное влияние на ход дифференциации. Какую роль при возникновении различных пород одной магматической провинции играют процессы дифференциации и ассимиляции, является в настоящее время очень спорным вопросом».

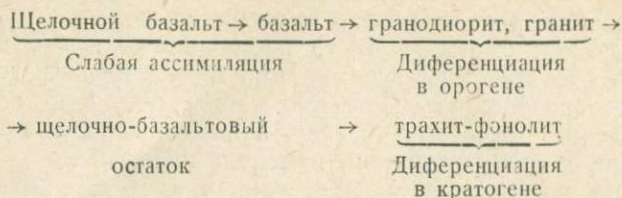
Нам следует обратить особое внимание на следующее выражение из работы Рейнгардта — «мигма, превратившись в магму»... Следовательно, образующиеся таким образом породы являются *чисто магматическими*. Понятие «мигма» должно обозначать «кашку», состоящую из неусвоенных реликтов и большого количества расплава; готовые жидкие расплавы или сконцентрированные

выделения расплавленного материала должны определяться как «магма». Часто наблюдаемые в небольшом масштабе процессы ассимиляции ведут, вообще говоря, не к образованию собственно магмы, но дают последовательные по своему составу, а потому и по своей тенденции к дифференциации, изменчивые магмы.

Однако не совсем еще ясно, могут ли подобные эффекты в отношении дифференциации появиться также вследствие других физико-химических условий и действительно ли является необходимым в данном случае загрязнение силалем исходной магмы. Против этого говорит многое, например огромный тихоокеанский магматизм американских прибрежных гор, противоположный глубокому кратогену (Tiefkratogen), так же как и вся история магм. С другой стороны, имеются явления, которые говорят в пользу подобного загрязнения, причем речь все-таки может идти только о ранней и подчиненной ассимиляции кислых пород вновь активизированной основной магмой.

Рассматривая явления с чисто физико-химической точки зрения, повидимому, вовсе не необходимо допускать вплавление, так как при известных условиях кристаллизационной дифференциации остаются растворы, пересыщенные  $\text{SiO}_2$ . Однако комплексная кристаллизационная дифференциация основной магмы по направлению к конечным гранитным магмам приводит, как это уже было ранее показано автором, к более или менее щелочным базальтовым остаточным магмам. Это объясняет, почему при переходе от орогена к кратогену происходит смена тихоокеанского типа атлантическим. При оживлении орогенеза становится однако заметным тихоокеанское направление магматизма. Можно было бы подумать, что последнее имеет место вследствие изменения остаточных щелочно-базальтовых магм в базальтовые, благодаря ассимиляции некоторого количества силала.

Это позволило бы еще понять слабый атлантический характер в начальных офиолитовых стадиях геосинклинальных областей; щелочно-базальтовая магма становится базальтовой. Схематически эту последовательность можно было бы изобразить следующим образом,



При этом следовало бы спросить, что же в конце концов было первичным; это напоминает вопрос: «что существовало раньше: яйцо или курица». С другой стороны, комплексная гравитационно-кристаллизационная дифференциация должна учитывать и чисто диффузионные явления. При этом прежде всего следует подумать о накоплении щелочей в верхних частях массы основной магмы, которая находится в относительном покое (У. Смит, П. Ниггли, С. Т. Томкеев). Щелочно-базальтовые магмы при длительном накоплении щелочей, благодаря подобного рода процессам, возникают из нормально базальтовых магм и влияют на ход дифференциации (например, в кратогене). В беспокойном орогене быстро появляется основная магма, которая и управляет последующим спокойным процессом дифференциации. Подобные соображения позволяют установить, что аналогичные эффекты могут быть вызваны различными причинами. Часто невозможно решить, что еще, в конце концов, происходило; в других случаях удается установить вероятность того или другого пути образования.

Однако все это проблемы, которые могут быть решены только в будущем. Нужно установить на основании тщательного наблюдения, какое же влияние оказывает ассимиляция на отдельные стадии процесса дифференциации. Воздействия подобного рода вовсе не отрицаются; необходимо только беспристрастное наблюдение, прежде чем делать широкие обобщения и выводы. Тогда скорее явится возможность сказать кое-что и по основному вопросу — об отношении *тектоники магмы к тектонике коры*.

#### ТЕКТОНИКА КОРЫ И ТЕКТОНИКА МАГМЫ

От представлений о взаимоотношениях между тектоническим поведением земной коры и магмой зависит мно-

гое в вопросе образования гранита. Являются ли первые изменения, возникающие в магме, причиной или следствием движений коры? Как ведут себя магмы и литосфера по отношению друг к другу в дальнейшем ходе тектонических явлений? Возрастает ли толщина континентального цоколя? Охлаждается ли земля? Возникают ли внутри земли вследствие некоторых превращений новые силы? Какова роль подземных токов в поднятии магмы? И т. д.

В 1834 г. Л. Бух совместно с Э. де-Бомоном и Дюфрэнца предприняли поездку в Италию и Сицилию, результаты которой были опубликованы в работе «Über Erhebungskratere und Vulkane»; она не знаменует собой возникновения взглядов на кратеры поднятия и хребты поднятия (по которым перемещающиеся из внутренности земли массы магмы рассматривались как причина образования гор), но эта работа помогла расширению представлений о кратерах поднятия.

В появившейся в 1844 г. работе Л. Буха «Über Granit und Gneiss» автор рассматривал центральные граниты горной области как огромный «пузырь», материал которого был уже в затвердевшем до известной степени виде, однако все же активно поднял в вертикальном направлении породы кровли.

Приблизительно в тот же период (с 1830 до 1834 г.) появилась работа Дж. Турмана, создавшая новую эпоху в этой области: «Essai sur les soulèvements jurassiques», в которой медленно, но последовательно выдвигается для юры теория поднятия в результате *тангенциального сжатия*. В 1846 г. после ряда предыдущих работ И. Дана сделал попытку объяснить эти тангенциальные силы, выдвинув гипотезу сжатия и сморщивания земли. После того как А. Гейм и Ф. Зюсс доказали пассивность Альпийских центральных гранитов при образовании Альп, долгое время тектоника складчатых гор считалась чистой дислокацией земной коры в твердом состоянии, затем на первый план выступили новые воззрения О. Амферера и А. Вегенера.

В настоящее время вопрос об отношении *тектоники тонкой оболочки земли* (Epidermotektonik) к глубинной тектонике, охватывающей массы магмы, является одним

из самых важных и спорных в геологии<sup>1</sup>. Представление о сморщивающейся и собирающейся в складки коже на более или менее нерасчлененном субстрате подвергалось полной ревизии. Вопрос о том, что имеет преимущество — тектоника магмы или тектоника земной коры, ставился различно, решался или отклонялся, как не имеющий смысла. Взаимоотношения вертикального и горизонтального движений, ассимиляции, ундации, с одной стороны, и сжатие, дрейф, течение — с другой, получают не менее разноречивые ответы, чем раньше.

Несколько новых хороших понятий было введено Х. Штилле. Уже по Л. Коберу в геосинклинальной зоне вначале становится жидкой сима и уже затем «гранитоидная» зона. «Колебания земной коры представляют отражение грандиозных процессов, происходящих на глубине и, в первую очередь, в зоне магмы. Она дышит, поднимается, опускается, затвердевает, охлаждается, снова становится жидкой» (Л. Кобер, «Die Orogentheorie»). Подобного рода фразы производят внушительное впечатление, однако в своей картинной неопределенности они слишком напоминают казавшиеся 400 лет назад грандиозными воззрения Джордано Бруно и Леонардо-да-Винчи. Между тем, точная наука достигла уже кое-чего, что должно было помочь уточнить и установить понятия. Проблема образования гранита и процесса перехода орогена в кратоген сохраняет при этом свое центральное значение. Первый основной вопрос, который нужно исследовать, это — каково строение глубин геосинклинальной области *перед* образованием складчатых сооружений. То, что она представляет более подвижной участок земной коры, чем кратоген, вытекает из ее последующего поведения. Но эта подвижность объясняется весьма различно. И опять некоторые неточные определения вносят пута-

<sup>1</sup> Для Х. Баклунда (цит. работа) тектоника магмы непонятна и в 1941 г. Он воспринимает магму, участвующую в процессах дислокации, как «задерживающую часть» или утверждает, что деформированные породы принимались другими исследователями при изучении «магматических» областей как «задерживающие плоскости». Если бы он был прав, что очень мало вероятно, то это было бы доказательством того, что необходимо подходить с большой осторожностью к проблеме «магматической тектоники и тектоники коры». (Прим. ред.)

ницу. Sial (Sal) и Sima (или Salsima) определялись, например, раньше химически. Но в геологической литературе они стали вскоре употребляться в смысле противопоставления твердой коры (Sial) и более или менее жидкого или способного течь субстрата (Sima). При этом совершенно забывают, что зона течения должна представлять сложное образование и ничто не оправдывает подобные произвольные изменения понятий. Вполне возможно, что в некоторых местах в определенное время зона течения проникает далеко в сиаль, в то время как в других местах массы симы (или Salsima) уже на большом протяжении относятся к более или менее твердой коре.

Означает ли большая подвижность орогена меньшую мощность земной коры, чем в кратогене? Представляет ли эволюция от орогена к кратогену нормальный однозначный процесс, связанный с ростом и охлаждением континентов? Многое говорит в пользу такого представления; но если бы мы хотели быть правдивыми, то должны были бы сказать, что мы знаем очень мало относительно свойств земли даже до глубины 80 км. Это лучше доказывается тем фактом, что Р. Ван-Беммелен несколько лет назад придерживался мнения, что ороген по существу представляет место, где основная магма дифференцируется в гранитную, сегодня же ему кажется, что гранит в большей своей части уже не представляет изверженную породу. Таким образом, имеется еще очень много неясностей.

Еще один пример: Х. Зенг<sup>1</sup> придает так много значения вопросу образования пород в глубине земли путем обмена веществ в твердом состоянии, что он задает следующие вопросы: «Действительно ли столь заметно с глубиной увеличиваются жидкие расплавы? Играют ли они такую преобладающую и часто решающую роль в обмене веществ внутри земли, какую им обычно приписывают? Имеются ли вообще иные расплавленные гранитные массы, кроме палингенных? Ставить подобные вопросы и заниматься обсуждением таких проблем — не серьезное занятие. Чтобы ответить на эти вопросы, нужна исследовательская работа целого поколения, и необходима согласованность результатов исследований, проведенных в самых различных областях и на самых различных глубинах, прежде чем мы будем иметь право с грехом пополам решать поставленные здесь вопросы».

<sup>1</sup> H. Seng. Die Migmatitfrage und der Mechanismus parakristalliner Prägung, *loc. cit.*, 479.

Поэтому на современной стадии наших знаний на петрографов не должны оказывать такого сильного влияния подобного рода вопросы, ответы на которые могут быть только чисто гипотетические. Еще очень многое ждет беспристрастного наблюдения и еще очень многое будет объяснено экспериментами. Приверженность к старым, необоснованным взглядам действует как тормоз, так как эти взгляды игнорируют некоторые новые направления в изучении тех или иных явлений.

Поэтому можно только приветствовать то, что вопрос об образовании гранитов вновь возникает как проблема после возвращения к старым и древним воззрениям. *В дальнейшем следует только попытаться проверить, насколько доказательны новые аргументы.* Но этого, несомненно, еще нет; и задачу делают слишком легкой. Гораздо более важным, чем выдвижение некоторых смелых предположений, является последовательная разработка рабочей гипотезы, ее беспристрастное развитие и подкрепление широкими (не только поверхностными) полевыми геологическими, химическими и химико-физическими исследованиями. Конечно, это должно иметь место не только для взглядов, которые, по мнению автора, в настоящее время получают гипертрофическое развитие, расходящееся с действительностью, но и для теории комплексной гравитационно-кристаллизационной дифференциации магмы.

Повидимому, необходимо большее, чем это было до сих пор принято, подчеркивание связующих элементов между различными классами пород. В классификации пород, исходящей из температур их образования, можно, не долго думая, объединить под названием «катапороды», например, изверженные и катаморфные породы и только уже во вторую очередь подумать о состоянии исходного материала. При рассмотрении явлений подобным образом будут более понятны аналогии и появятся новые точки зрения, без игнорирования фактов, установленных опытами. При этом вполне возможно изменение до сих пор господствующих теорий.

До сего дня слишком мало принималось во внимание намечавшееся в прошлом стремление объединить наблюдаемые факты. *Искусственно сгруппировались очень*

разнородные элементы, противоречивые идеи демонстративно объединялись в оппозицию. Основная мысль, что необходим пересмотр школьных воззрений, конечно, вполне обоснована, но забывают то, что сказал в своем докладе «Значение и границы точных наук» М. Планк: «Вопрос о том, в каком месте и каким образом следует произвести это изменение, представляет подчас большое затруднение. Чем более обоснована возникающая теория, тем более устойчивой она оказывается против всех попыток ее изменения. В этом смысле ее можно сравнить с высокоразвитым разветвленным организмом, отдельные части которого взаимно обуславливают друг друга и так связаны, что повреждение, произведенное в одном месте, тотчас же отражается и в других местах, кажущихся далеко удаленными».

**Дополнение.** Эта рукопись послужила основой доклада, сделанного в начале февраля 1942 г. в Цюрихском геологическом обществе. Уже перед сдачей в печать автор в конце февраля получил работу Ф. Гроута<sup>1</sup>. Эта работа, дополняющая наши высказывания, содержит весьма ценную библиографию и должна оказать помощь всем интересующимся гранитной проблемой. Тот факт, что иногда по ходу мыслей настоящая работа и работа Гроута до деталей перекрывают друг друга, виден из следующих двух цитат; на стр. 1528 Гроут пишет:

«Современные авторы предполагают теперь, что породы, имеющие вид изверженных, являются в столь многих местах результатом метасоматизма, что этот процесс считался установленным, совершенно упуская из вида всю сложность проблемы; они ссылаются друг на друга, как на авторитеты, однако ни один район не описывается должным образом. Похоже на то, что эти ярые в своих идеях защитники заходят слишком далеко, фигурально — на много километров в окружности; консерваторы же допускают несколько метров; истина находится посредине, но консерваторы имеют на своей стороне вес фактов, а защитники экстенсивной гранитизации — вес доказательств».

<sup>1</sup> F. F. Grout, Formation of igneous-looking rocks by metasomatism. A critical review and suggested research, *Bull. Geol. Soc. of America*, 52, 1525—1576, 1941.

И на стр. 1568: «Всякий, кто думает, что имеется очень много пород, по виду похожих на изверженные, но образовавшихся путем замещения, должен не просто бросить на них поверхностный взгляд и строить предположения, но должен тщательно изучить этот факт; и если он будет благоприятным, собрать материал для исследований и направить его группе экспертов по определенным разделам — химизма, петрологии, метасоматизма, геоморфологии и т. д., чтобы быть уверенным, что ни один из этих показателей не противоречит правдоподобности идеи».

Гроут разъясняет понятия: магматический, послыйные инъекции, ассимиляция, метасоматоз, замещение, гранитизация, ультраметаморфизм, мигматит, и выступает против смешения терминов.

Особого внимания заслуживает сопоставление отличительных признаков, которые говорят в пользу метасоматического замещения, так как «любая, широко не признанная идея встречается с возражениями». Ее очевидность устанавливается тщательным критическим рассмотрением других исследователей (стр. 1541).

Также и в отношении «литогенного образования магм» между Гроутом и автором настоящей статьи имеется полное единогласие: «В конце концов, имеются породы, которые приобретают вид изверженных путем палингенеза (переплавления, анатексиса) или возможно путем частичного перехода в пластичное состояние, часто называемое реоморфизмом. Поскольку в результате процесса возникает магма или частичная магма, породы рассматриваются как типично изверженные, и замещение, происходящее в твердой оставшейся переплавленной части, представляет незначительный фактор в создании изверженного облика. Необходимость подобного палингенеза в земной коре недостоверна, но породы могли быть размягчены на такой глубине, которая приближается к зонам, где образуется магма. Они выходят на дневную поверхность только, если эрозия особенно велика, и только местами могут быть изучены и то лишь на больших площадях щитов» (стр. 1563).

Опыт, который проделал Гроут, руководил и автором настоящей статьи. Гроут пишет: «Окончательный крити-

ческий выбор метода составления статьи по замещению основан на опыте автора приводить выдержки из работ других исследователей по гранитизации и метасоматическим процессам. Многие из тех, кто пишет, что другой исследователь имеет данные или факты, подтверждающие какой-нибудь взгляд или вывод автора, вводят читателя в заблуждение, так как цитированный автор «никогда не приводит таких доказательств или данных» (стр. 1567). Например, Феннер говорит (личное сообщение): «иногда для меня бывает сюрпризом, какое значение (или недостаток) приписывали опубликованным мной взглядам». Это послужило основанием как Гроуту, так и автору в двух критических статьях предоставить различным авторам возможность говорить цитатами из своих работ.

Н. БОУЭН

МАГМЫ

N. BOWEN

MAGMAS

*Bulletin of the Geological Society of America*, 58

N. 4, 263—280, 1947

Магмы — это тот материал, который дал начало изверженным породам<sup>1</sup>. Было бы прекрасно, если бы я здесь сразу мог сказать вам все о магмах. Разумеется, сделать этого нельзя, но может быть естественно было бы ожидать, что человек, проведший лучшую часть своей довольно долгой жизни за изучением магмы, мог бы суммировать то, что известно об этом. К сожалению, однако, нам легче, пожалуй, сказать о том, что мы не знаем о магмах, чем то, что мы о них знаем. В первом мы будем по большей части гораздо авторитетнее. В самом деле... не удовольствие, а скорее отчаяние (слово, которое, к счастью, отсутствует в научном лексиконе) может наполнить наши сердца, когда мы начинаем размышлять о наших познаниях в области магмы. Но мы никогда не можем быть лишены некоторой надежды, что, в конце концов, что-нибудь будем о них знать. Тем не менее, более благотворным чаще бывает признать, что это время от нас еще очень далеко, и отдать себе отчет в размерах собственного невежества.

**РАСХОЖДЕНИЕ ВО ВЗГЛЯДАХ НА ГЛУБИННЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ**

Наше непосредственное знакомство с магмами ограничивается наблюдениями над расплавленной горной породой или лавой при вулканических извержениях. Многие предполагали, что эта лава происходит из глубоко

<sup>1</sup> Статья представляет собой изложение доклада Н. Боуэна, сделанного на собрании Американского геологического общества в 1947 г. (*Прим. ред.*)

залегающих в земле резервуаров, содержащих расплавленные массы, и что некоторые глубинные кристаллические горные породы, в настоящее время вскрытые эрозией, произошли при затвердевании (застывании) материала, содержащегося в таком резервуаре, материала, по существу того же самого, который мы непосредственно наблюдаем в виде лавы. Другие утверждают или готовы утверждать, что ничего не может быть дальше от истины, чем это предположение, что нет никакой связи между вулканизмом и плутонизмом.

С особенным пылом вступил в этот спор Рид (Reed), заявивший, что, по его мнению, «во всей земной коре не найдется такого диорита, который бы представлял собой нормальную изверженную породу». Ряд геологов, не менее, повидимому, компетентных, считает несомненным существование диоритовых магм и, следовательно, существование нормальных «изверженных» диоритов. Это является превосходным примером недостатка наших точных знаний. Однако огромные массы андезитов, встречающиеся на некоторых участках земной поверхности, не могут представлять собой только своего рода «фульгуриты», образовавшиеся в гигантском масштабе. Хотя мы находим их на поверхности, они, повидимому, все же не могли образоваться в результате каких-то внешних сил. Напротив, они кажутся пришедшими из глубины и, следовательно, расплавленный материал, который они некогда представляли, должен был когда-то существовать в виде массы, залегавшей на глубине. Если же прав Рид, такие подземные расплавленные массы и даже какая-либо их часть никогда не могли существовать на глубине и там кристаллизоваться с образованием диорита, а глубинные породы такого состава всегда образуются путем пропитывания и изменения других горных пород, которые в большей своей части оставались твердыми в течение всего этого процесса. Однако, чтобы объяснить образование андезитовых лав, и, по крайней мере, некоторых предполагаемых «пропитанных» диоритов, концепцию Рида, очевидно, надо отбросить.

Ввиду изобилия диоритов кажется необходимым допустить вероятность существования значительных количеств магмы диоритового состава, заключенных в зем-

ной коре и кристаллизующихся там с образованием нормальных изверженных диоритов. Рид, повидимому, допускает возможность такого рода соображения, но предпочитает его рассматривать как слишком «трезвое».

Сам по себе факт существования такого рода широких расхождений во мнениях между выдающимися петрологами является печальным.

Мы можем, грубо говоря, разделить петрологов на «трезвенников» и «пьяниц». Однако и среди «трезвенников» (pontiffs), несущих знамя магмы, не найдется такого, который бы не признал, что магма содержит летучие компоненты, главным из которых является вода, и что эти компоненты могут выделяться из магмы и давать жидкость, которая будет проникать в окружающие породы, преобразуя их иногда в породы, сходные с изверженными. Разница между «трезвенниками» и «пьяницами» (soaks) будет заключаться в том, что последние растрачивают свою жидкость расточительно, почти при каждом случае, в то время как первые расходуют ее бережно; они могут или израсходовать (take) ее всю, или оставить, в соответствии с каждым отдельным случаем; они могут употреблять ее умеренно, если это нужно, или расходовать ее в обильных количествах и, однако, сохранять еще способность трезвого размышления о сопровождающих обстоятельствах.

Расхождение в мнениях, таким образом, очень велико и мало оснований думать, что его удастся избежать в ближайшем будущем. Мы можем, однако, говорить о магмах и при этих расхождениях, так как даже самые убежденные представители второй группы допускают существование магм, скажем, первичной магмы или первичных магм. Может быть было бы меньше расхождений в петрологии, если бы мы знали, откуда берутся эти первичные магмы.

### **ИСТОЧНИК МАГМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КОСМОГОНИИ**

Ответ на вопрос об источнике магм неизбежно связан с вопросом о составе земного шара и с проблемой происхождения земли. Еще не так далеко то время, когда мы были уверены, что земля некогда представляла

расплавленный шар, что затем на ней появилась застывшая оболочка и что расплавленная магма в течение геологических времен поднималась из еще жидких глубин, внедряясь в земную кору и временами изливаясь на поверхность.

Успехи в познании физических свойств земного шара привели к ревизии взглядов на его внутреннее строение и это вместе с другими соображениями привело к значительному пересмотру взглядов и на происхождение земли. Я не собираюсь детально описывать последовательный ход изменения взглядов по этому вопросу. Достаточно будет указать, что небулярная гипотеза была заменена впоследствии гипотезой планетезималей (tidal-disruption theory), выдвинутой геологом Чемберлином, который добавил к ней, как следствие, медленное путем постепенного нарастания, увеличение земного шара, находившегося всегда в твердом состоянии; обстоятельство, необходимое для объяснения факта высокой жесткости земли, согласно измерениям Майкельсона Гэля, проведенным по инициативе Чемберлина, распространения приливных волн в земной коре (crustal tide). Планетезимальная теория пользовалась широким признанием в течение некоторого времени, позже стала несколько «выходить из моды», но, как мы увидим, может быть, снова получит некоторое значение. Она пользовалась большой популярностью и была развита астрономами, включившими в нее также идею о конденсации газовых выбросов в жидкое состояние, идею, возвращающую, короче говоря, снова к точке зрения существования некогда расплавленного земного шара. В конце концов, эта концепция понесла решительный урон, когда удалось показать убедительным для самых авторитетных исследователей образом, что продукты разрыва, возникшие под влиянием действия приливных сил (tidal disruption), никогда не будут скопляться; наоборот, они будут бесконечно рассеиваться.

После этого последовал период, в течение которого преобладал полный агностицизм в вопросе о происхождении земли и ее аналогов в солнечной системе. Позже, в 1944 г., Вейцекер выдвинул гипотезу, возвращающую нас отчасти к Лапласу, отчасти к Чемберлину.

Согласно его представлениям, первичное солнце имело туманную оболочку, составлявшую по своей массе одну десятую центрального солнца. Эта оболочка в дальнейшем приняла форму экваториального диска. Туманное вещество этого диска состояло, так же как современное солнце, на 99% из водорода и гелия и содержало только 1% тяжелых элементов. Эти тяжелые элементы существовали в туманном диске в виде твердого материала, рассеянного между газообразными частицами H и He. В результате развития вихрей и столкновений мелких твердых частиц (планетезималей) происходило скапливание этих частиц с образованием планет и их спутников; в течение этого процесса почти весь водород и гелий рассеялись в мировом пространстве. Гипотеза дает объяснение углового момента в солнечной системе и распределения планет. Она лишь частично разработана и рассчитана, но встретила пока благосклонное отношение. То, что в ней представляет особенный интерес для геологов,—это процесс скопления холодных планетезималей с образованием планет. Те, кто предпочитают идею о существовании первично расплавленного земного шара, могут предполагать, что этот процесс скопления твердых частичек происходил с такой скоростью, что теплота, возникающая при столкновениях частиц и постепенно накапливавшаяся, была достаточна для образования расплавленной массы. Другие могут предпочитать представления Чемберлина о твердом земном шаре.

Ответственность астрономов за разработку этих сторон нашей проблемы, конечно, гораздо больше, чем наша собственная. Мы благоговеем перед их глубокими познаниями эволюции звезд. Они со спокойной уверенностью говорят о составе и физическом состоянии различных слоев небесных тел, удаленных от нас на тысячи световых лет. Мы поражаемся этим познаниям, подобно тому как Марк Твен дивился тому, что им известны даже названия этих небесных тел. Однако определенные знания о ранних стадиях развития планеты, на которой мы живем, еще совершенно отсутствуют.

Есть только одно заключение, которое вытекает неизбежно из этих рассуждений. Космогонические теории

не дают пока никакого удовлетворительного базиса для какой-нибудь теории происхождения магм.

### ИСТОЧНИК МАГМЫ; ПРОБЛЕМА ТЕПЛА

В то время как космогонические теории возникали и отмирали, наши знания о строении вещества постепенно развивались и находили свое отражение и в космогонических идеях. Земля Лапласа — Кельвина поставила нас в затруднение. Земля не могла бы удерживать такое количество тепла, на какое указывает геотермический градиент, в том случае, если ее возраст превосходил бы 20 млн. лет. Эволюция органического мира требует гораздо большего периода времени. Для земли Чемберлина необходимо допустить большой запас тепла, полученный в результате центрального сжатия. Вместе с открытием в начале нашего века самопроизвольного распада некоторых атомов трудности как будто исчезают; избыток тепла и, следовательно, избыток времени предоставляются в наше распоряжение. Действительно, это открытие показало, как много времени имелось в нашем распоряжении, так как неустойчивые атомы являются своего рода геологическими часами. Другие атомы, устойчивые в нормальных условиях, могут быть превращены в неустойчивые модификации путем соответствующей «бомбардировки», и внутриатомные реакции, подобные описанным под названием «углеродного цикла», были привлечены для объяснения сохранения тепла самим солнцем.

История становится запутанной и не место излагать ее обстоятельным образом, даже если бы это было для меня возможным. Нужно сказать, что запас солнечного тепла достаточно огромен для того, чтобы объяснить сохранение замечательно однообразных условий на земной поверхности в течение миллиарда или более лет, и запас тепла земли достаточно велик для того, чтобы объяснить наблюдаемый термический градиент и вулканическую деятельность. Действительно, кажется вероятным существование избыточного земного тепла. Имеющиеся к настоящему времени указания на количество радиоактивных минералов в горных породах и совре-

менные сведения о геотермическом градиенте заставляют думать, что земля теряет свое тепло с меньшей скоростью, чем его производит. Правда, новейшие определения приводят к некоторому уменьшению ранее полученных цифр для содержания радиоактивных элементов в породах, и проблема, таким образом, может быть решена по-другому. Может быть также, мы могли бы «освободиться» от некоторой части тепла, унаследованного от предполагаемого расплавленного земного шара, если приняли бы, что земля действительно образовалась из холодных планетезималей в результате достаточно медленного их сближения.

### **ИСТОЧНИК МАГМЫ С ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ И ПЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧЕК ЗРЕНИЯ**

Ответа на вопрос — почему возникают магмы и откуда они приходят, следует искать в наших познаниях о современных свойствах земного шара и о его свойствах в прошлом. Другими словами, мы должны основывать наши заключения на физике земли и на данных геологии. По этим вопросам мы отнюдь не лишены точных знаний, но, как мы увидим, эти познания недостаточны для вывода определенных заключений.

Геологические данные показывают, что базальтовая магма занимает особое положение в общей «изверженной экономике». Она принимается многими в качестве единственной или одной из первичных магм.

Этот тип расплавленного вещества во все времена пробивал себе дорогу через земную кору, образуя дайки огромных размеров и изливаясь на поверхность в виде мощных потоков. Он проявлялся в виде силлов и других согласных интрузивных тел, заключенных между пластами слоистых пород. В более крупных интрузивных массах этого рода после затвердевания проявилась система слоев, обязанных своим происхождением, хотя бы в некоторой мере, процессам кристаллизационной дифференциации, протекавшим, повидимому, в основном под контролем гравитации. Поскольку, как это часто имеет место, состав многих из этих слоев значительно отличается от состава базальтовой магмы, ряду петрологов

казалось неизбежным прибегать для объяснения их образования к другим факторам, помимо одной дифференциации базальтовой магмы. К этому вопросу мы вернемся в дальнейшем.

В то же время мы должны считаться с теми несомненными фактами, установленными при изучении физики земли, которые связаны с объяснением возможного источника базальтового материала. Здесь мы, к несчастью, не находимся еще на вполне надежной почве и расхождение мнений, следовательно, еще весьма широко. Наблюдаемые термические градиенты, причем только во внешней оболочке земли, скорость распространения колебаний на различных глубинах при землетрясениях, высокая прочность земли в целом по отношению к приливным силам, слабость земли с точки зрения поддержки внешних ее слоев внутренними, плотность земного шара в целом, его момент инерции — таковы важнейшие факты, на которых должны быть обоснованы наши заключения. Одним из наиболее деятельных мыслителей в этой области был Дэли, проложивший мост между петрологией и геофизикой. В течение долгого времени он защищал идею о перегретом, стекловатом, базальтовом субстрате, который присутствует повсеместно на глубине 60 км. Дэли был настолько красноречив, что многие из сейсмологов считали эту идею установленным геологическим фактом и обычно упоминали о базальтовом слое без особых комментариев. Однако измерения упругих свойств пород, сделанные Адамсом и Вильямсоном (1923) и Адамсом и Гибсоном (1926), дали такие результаты, которые заставили сильно усомниться в предположениях Дэли. В то же время эти измерения дали значительную поддержку в пользу их вывода о том, что, по всей вероятности, единственным типом породы, который мог бы передавать волны с теми скоростями, которые наблюдения указывают для этих глубин, была оливиновая порода. Харвардская геофизическая группа предприняла измерения констант горных пород для того, чтобы проверить эти предварительные результаты, и вначале, казалось, полученные ею данные говорили скорее в пользу теории Дэли о стекловатом базальте. Однако дальнейшие измерения не подтвердили

этих указаний, и Дэли, в конце концов, отказался от универсального стекловатого базальтового субстрата и, по той же причине, — от стекловатого перидотита (1946). Откуда же тогда берется базальтовая магма? Дэли сейчас предполагает о существовании многочисленных локальных резервуаров расплавленного базальта в верхних горизонтах земной коры. Я предполагаю (Боуэн, 1928), что базальтовая магма образовалась при фракционном переплавлении кристаллического перидотита, близкого к оливиновой породе Адамса и Вильямсона, но не с таким высоким содержанием оливина, какое, по их мнению, должно было быть в такой породе, чтобы объяснить скорость распределения волн. Сам Дэли сейчас подходит к признанию существования перидотита такого характера на соответствующей глубине, но он скорее склонен рассматривать его как более легкоплавкую часть, постоянно присутствующую в жидком состоянии в качестве интерстиционного материала, считая, что такое состояние необходимо для того, чтобы объяснить известную слабость слоя на этой глубине по отношению к длительной нагрузке. Но высокая плотность по отношению к таким кратковременным нагрузкам, как волны, распространяющиеся при землетрясениях, или приливные силы, может быть согласована и с представлением о вполне кристаллическом материале, который становится слабым лишь в условиях длительной нагрузки. Многие последующие исследования подтвердили эти предположения, и теоретические работы Губерта (1945) окончательно убедили в них. Допущения Дэли о существовании непрерывной интерстиционной жидкости в веществе такого слоя не кажутся сейчас необходимыми. Во всяком случае, Дэли не рассматривает этот интерстиционный материал как источник базальтовой магмы, но, как было указано, все еще верит в существование резервуаров жидкого (стекловатого) базальта.

Некоторые предположения говорят о периодическом переплавлении кристаллического базальтового слоя под влиянием тепла радиоактивного распада, может быть облегчаемого благодаря местному утоньшению вышележащих частей земной коры. Подвергающийся переплавлению базальтовый слой имеет, с точки зрения Кен-

неди и Андерсона (1938), двойственный характер, имея сверху состав толеита, внизу — состав оливинового базальта. Первый дает начало ассоциации габбро-гранофир, а второй — щелочным типам пород. Так как оба предполагаемых слоя должны были первоначально возникнуть из одного и того же материала, трудно защищать утверждение, что оливиновый базальт должен был раз навсегда истощить свои силы, создав толеитовые дифференциаты и их дериваты.

### ПРИРОДА ПЕРВИЧНОЙ БАЗАЛЬТОВОЙ МАГМЫ

Пожалуй, еще больше неясности существует в вопросе о природе первичной базальтовой магмы, помимо вопроса о ее изменчивости, в духе высказываний Кеннеди и Андерсона. Я обращаюсь к вопросу о содержании в ней воды. Гилюли (1937) произвел, пожалуй, самое полное исследование этого вопроса и склонился к взгляду, что первичная базальтовая магма содержит свыше 4% воды. Интересные исследования Фемистера (1934) можно считать подтверждающими этот тезис. Фемистер рассматривает общий вопрос о растворимости воды в базальтовой магме и о повышении растворимости в связи с повышением давления и приходит к заключению, что гидростатический столб воды в породах достаточен для того, чтобы допустить высокое содержание воды в базальтовой магме на глубине.

Можно отметить известные слабости в обоих концепциях. Цифры Гилюли основываются преимущественно на анализах базальтов и возможно, что содержащаяся в последних вода была приобретена ими в процессе вторичных изменений, т. е. в породах, уже полностью закристаллизовавшихся; в случаях же, когда на присутствие воды в магме имеются непосредственные указания, как, например, в некоторых стекловатых «волосах Пелэ», возможно, что магма приобрела ее из «влажных» пород на умеренных глубинах. По вопросу, затронутому Фемистером, мы можем обратиться к свидетельству самих пород, например к минералогии последовательных глубинных зон. Метаморфические породы, объединяемые как кристаллические сланцы, считаются достигшими

высокой степени приближения к равновесию с окружающей средой. В верхней зоне мы находим хлоритовые, серицитовые и тальковые сланцы; в средней зоне — актинолитовые сланцы, амфиболиты и эпидотовые гнейсы; в глубокой зоне — пироксеновые гранулиты, гранатовые гнейсы и силлиманитовые и кордиеритовые гнейсы. Вкратце, с глубиной имеет место прогрессивное уменьшение содержания воды в типичных минералах.

Одним из возможных толкований этого положения, может быть, является то, что температура глубоких зон слишком велика для образования водосодержащих минералов, даже при господствующих там высоких давлениях, но более вероятно, что главный источник воды в породах находится на поверхности или на малых глубинах и что механические барьеры к проникновению такой воды на большую глубину являются вполне эффективными. С этой точки зрения, хотя вода и может обладать высокой степенью растворимости в базальтовой магме при высоких давлениях, но на больших глубинах ее может быть растворено малое количество. При принятии той или иной космогонической гипотезы можно допустить любое желаемое количество воды в глубоких слоях, но нельзя допустить такие предположения, которые вступают в противоречие с геологическими данными.

Повидимому, геологические данные в малой степени поддерживают теорию о высоком содержании воды в базальтовой магме на глубине. Диабазовые дайки, секущие почти все осадочные отложения, не показывают с глубиной систематического обогащения роговой обманкой. Диабазовые дайки в древнейших, наиболее эродированных областях являются такими же, как и диабазы в самых молодых и близких к поверхности породах. Ни роговая обманка, ни эпидот, ни хлорит не развиваются систематически в качестве продукта первичной кристаллизации в глубинных дайках. Казалось бы, что отсутствие роговой обманки может быть объяснено недостатком необходимого количества воды в магме. Считается, что магма базальтового состава в некоторых случаях кристаллизуется, образуя породу, почти цели-

ком состоящую из роговой обманки. Это редкое явление, очевидно, контролируемое какими-то местными условиями, повидимому, не имеет тенденции к нарастанию с глубиной, но оно раскрывает потенциальные возможности базальтовой магмы с определенным содержанием воды. Однообразный характер многочисленных диабазовых даек, несомненно поднявшихся из больших глубин, во всех областях мира отвечающих по составу первичной базальтовой магме, если таковая существовала, является, таким образом, ясным указанием на сравнительно безводный характер первоначальной базальтовой магмы. Такая магма может приобретать по временам значительное количество воды из окружающих пород. Но это обычно только производная (*derivative*) магма, которая содержит известное количество воды, частично представляющей результат концентрации относительно малых количеств воды, содержавшейся в первичной базальтовой магме, частично, возможно, захваченной из окружающих пород.

Имеются некоторые особые условия, при которых базальтовая магма может в отдельных случаях приобретать воду, с результатами, которые могут быть соответствующими (*pertinent*) настоящей связи. Включения чуждых пород в некоторых случаях непосредственно вводят воду в магму, окружающую эти включения, и вызывают в них более грубозернистую кристаллизацию, с образованием габбровых пегматитов, которые могут содержать роговую обманку. Количество принесенной воды не может быть очень велико, однако оно глубоко воздействует на величину зерна кристаллизующихся продуктов. Это наблюдение наводит на мысль о том, что если бы первичная базальтовая магма действительно содержала заметные количества воды, то все глубинные дайки из этого материала должны были бы кристаллизоваться как габбро-пегматиты, если не как вышеупомянутые горнблендиты. Как будто, однако, не наблюдается систематической тенденции такого рода. Действительно, по размерам зерен глубинные диабазы мало отличаются от диабазов, слагающих внутренние части поверхностных базальтовых потоков. Здесь снова перед нами указания на первоначальное невысокое

содержание воды в базальтовой магме. Так, по крайней мере кажется мне, расхождение во мнениях еще раз иллюстрирует неудовлетворительное состояние наших знаний.

### ДРУГИЕ ПЕРВИЧНЫЕ МАГМЫ

Предполагались и другие первичные магмы, помимо базальтовой. Чаще всего, может быть, говорилось о перидотитовой магме. Геологи Принстонской школы (среди них Баддингтон, Хесс, Семпсон, Пиплз) в течение долгого времени проявляли много интереса к проблеме ультраосновных пород и в результате ряда глубоких исследований сделали много важных добавлений к нашим сведениям об этих породах. Одним из заключений (выводов), к которым пришли по крайней мере некоторые исследователи из этой группы, было то, что существуют первичные перидотитовые магмы. Холмс с сотрудниками, идя совсем другим путем, как будто пришел к заключению, что перидотитовые магмы являются главным переносчиком тепла во всех случаях магматической деятельности. Обычно предполагается, что перидотитовая магма исходит из перидотитового слоя в земном шаре, находящегося предположительно частично в жидком (стекловатом) состоянии. Баддингтон (1943) дал интересную картину развития земли, в которой предполагается возможный способ образования перидотитового слоя путем концентрации сверхплавких компонентов. Предполагается, что этот слой является источником перидотитовых и серпентинитовых интрузий. Хесс (1938) также придерживается своей концепции о существовании серпентинитовой магмы; другие, в частности Гизольф (Gisolf, 1923) и Дэли (1933), в прошлом также развивали подобные взгляды. Высказывалось предположение, что гидратная фаза серпентинита отделялась от гидратной магмы таким же образом, как отделяется от нее гидробиотит. Однако типичные соотношения, наблюдаемые в породах, содержащих одновременно биотит и серпентин, таких, как слюдяные перидотиты (серпентиниты), дают мало оснований в пользу этого заключения. Биотит присутствует в них

в форме широких однотипных пластинок, обычно охватывающих агрегаты перистого серпентина; каждый такой пятнистый участок представляет, очевидно, псевдоморфозу по кристаллу оливина.

Гизольф (1923) описал пластинчатые зерна серпентина, погруженные в оливин, и вывел отсюда заключение, что кристаллизация серпентина предшествовала здесь кристаллизации оливина. Однако в зернах фаялита из Рокпорта (Массачузетс) наблюдались подобные же пластинки грюнерита, прорезающие оливин; в действительности же грюнерит здесь моложе оливина (Боуэн и Шерер, 1935). Подобным же образом в дунитах из Cogundum Hill (Сев. Каролина) кристаллы магнезиального оливина содержат пластинчатые зерна куммингтонита, явно более позднего.

В течение некоторого времени я предполагал (Боуэн, 1928), что перидотиты, в том случае если они не подвергались дифференциации на месте, были интродуцированы существенно в форме твердого материала, и я указывал на некоторые геологические данные в пользу этого взгляда. Имеются некоторые трудности в применении этого представления для ряда случаев, однако, мне кажется, они незначительны в сравнении с теми трудностями, которые возникают, если предполагать существование расплавленного оливина. Серпентиниты я считал породами, образующимися в результате вторичных изменений в оливиновых и оливино-пироксеновых породах. Во многих серпентинитах первичная текстура оливина или оливин-пироксеновых агрегатов может быть распознана в материале псевдоморфоз и несомненно, что первичные минералы занимали первоначально почти все пространство. Таких явлений, вероятно, нельзя было бы ожидать в результате затвердевания жидкости, имевшей первоначально состав серпентинита.

Не все серпентиниты имеют, однако, такую текстуру. Насколько можно установить, некоторые серпентинитовые массивы, частично; по крайней мере, могли быть таковыми с самого начала; однако ни один продукт первичной кристаллизации даже отдаленно не походит на серпентин. Многие серпентиниты были интродуцированы как независимые массы, удаленные от каких-

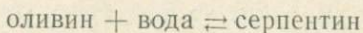
нибудь интрузивных тел. Чтобы объяснить это, я допустил возможность внедрения (интрузии) серпентинизированной массы при невысоких температурах (Боуэн, 1938) в особых условиях стресса, которые Бенсон (1926) и другие считают типичными для этих интрузий. Хесс (1938) описывает серпентиниты Кубы как результат внедрения в неуплотненные осадки на небольших глубинах. Казалось бы, непреодолимые трудности должны возникнуть здесь на пути гипотезы внедрения горячего кристаллического серпентинита; но не будет ли еще сложнее проблема сохранения серпентинитовой магмы в таком непрочном «сосуде»? По мнению Хесса, серпентинитовая магма должна быть сильно «взрывчатой»; этой ее особенностью он хочет объяснить отсутствие лав серпентинитового состава.

Магма, отвечающая по составу серпентину и содержащая в себе 13% воды, должна была бы быть идеальной магмой для образования крупных кристаллов серпентина. Можно было бы ожидать нахождения в миаболитовых пустотах особенно хорошо сформированных кристаллов серпентина, не уступающих кристаллам, находимым в пегматитовых гнездах в гранитах. Что же имеет место в действительности? Серпентин встречается лишь в тончайших волокнистых или пластинчатых агрегатах, и морфология кристаллов серпентина совершенно неизвестна.

Дальше можно было бы указать, что предполагаемые серпентинитовые магмы не имеют, повидимому, никакой или почти никакой, склонности к привнесу воды или водных растворов в окружающие породы. Такое поведение было бы замечательным для материала, достаточно горячего для того, чтобы сохраниться в жидком состоянии даже при столь высоком содержании воды. Он должен был бы неизбежно показывать высокое давление паров воды, иначе нельзя было бы объяснить предполагаемый взрывчатый характер магмы. Но масса кристаллического оливина могла бы быть только теплой или умеренно горячей; подвергаясь перемещению в новые положения и при этом испытывая грануляцию, скольжение и другие воздействия, облегчавшие течение кристаллического материала и способствовавшие тес-

ному проникновению воды для «смазки» (Сосман, 1938), она вполне могла (если окружающие породы были влажными) действовать «высушивающим» образом, жадно поглощая из них воду, с последующим образованием серпентина.

Другими словами, давление пара было слишком низким для того, чтобы имела возможность протекать реакция, которую мы схематически можем обозначить так:



Образование некоторого количества серпентина могло бы тогда значительно облегчить дальнейшее течение и продвижение массы в другие участки, где новые порции воды могли бы быть захвачены для дальнейшего превращения оливина и окончательного формирования интрузивной массы серпентинита. Такая схема согласуется и с отмеченным Хессом тяготением серпентинитов к породам, для которых можно предполагать первоначально влажное состояние, таким, как геосинклинальные осадки, а для малосерпентинизированных оливиновых пород — встречаться в более «сухом» окружении, как, например, в породах древнего кристаллического субстрата.

Все еще остается открытой проблема о первоисточнике тех перидотитов (серпентинитов), которые образуют самостоятельные массивы, не связанные с другими типами изверженных горных пород. Эта их изолированность заставляет высказывать сомнение в отношении предполагаемого способа их образования путем накопления кристаллов в габброидной магме, если только не предположить, что перидотиты (первоначально частично серпентинизированные), будучи твердыми, были в то же время более мобильными, чем какие-либо другие дифференциаты, и могли отделяться от своих спутников. Может быть, эти массы проникали из перидотитовой оболочки земли, но они как будто не приносили с собой тех температур, какие предполагаются для этих зон, толковать ли их по Баддингтону, Дэли, Хессу или еще по какому-нибудь другому автору. Предполагаемое присутствие от 10 до 15% воды должно было значи-

тельно понизить температуру затвердевания магниевых силикатов, но не могло понизить температуру вообще. Это должна была бы быть температура перидотитового слоя. Магма эта должна была быть наиболее горячей из известных магм и должна была бы плавить все в своих контактах. В целом, происхождение серпентинитовых интрузий продолжает оставаться большой загадкой.

### ПРОИЗВОДНЫЕ (DERIVATIVE) МАГМЫ

Рассмотрев некоторые из предположений, которые были сделаны относительно первичных магм, иных, чем базальтовые, и подчеркнув недостаток наших точных знаний, мы можем теперь обратиться кратко к проблеме производных магм. Между петрологами существует сравнительное согласие во мнениях о том, что широкое разнообразие горных пород может быть получено из первичной базальтовой магмы. По одной точке зрения, которую в значительной части поддерживают экспериментальные изучения силикатных расплавов, непрерывно изменяющаяся материнская жидкость, образующаяся в результате продолжительной фракционной кристаллизации, может иметь любой состав, изменяющийся от базальтового до гранитного, и в процессе кристаллизационной дифференциации может образоваться серия пород, непрерывно изменяющихся от габбро до гранита. Только немногие отрицают это полностью. Они заявляют, что относительное количество остаточной жидкости гранитового состава, образующейся таким образом, так мало, что она никогда не могла быть выжата из кристаллизующейся массы, с тем, чтобы образовать самостоятельные тела. Это по большей части те же самые люди, которые «производят» гранитную магму только в результате частичного переплавления гранита или осадков соответствующего состава и, как я уверен, не находят никакой трудности в «выжимании» получающейся таким путем интерстициальной жидкости, когда она присутствует в недостаточных количествах. В любом случае, вероятно, небольшое количество жидкости может быть отделено от кристалличе-

ской «губки» в условиях умеренного стресса, создающего возможность растворения и перекристаллизации материала в пространствах между зернами.

Некоторые петрологи, ближе знакомые с теми районами, в которых интрузивы имеют сравнительно умеренные размеры, указывают на тенденцию к развитию в таких телах только габбро и гранофира и заявляют, что только два этих крайних члена могут развиваться при кристаллизационной дифференциации, если они вообще желают признать, что этот процесс может создать такого рода ассоциацию. Когда они сталкиваются с породами других районов, среди которых присутствуют типы промежуточного состава, они заявляют, что эти промежуточные типы являются не изверженными породами, а представляют породы «пропитанные» (soaked) или гибридные. Однако изучение лав, т. е. охлажденных магм Западных Кордильер, обнаруживает несомненное существование непрерывных вариаций по линии ликвидуса, нисходящей от базальтовой к гранитной жидкости. Это доказывает, во всяком случае, только существование всех промежуточных жидкостей, но не объясняет способа их образования: изучение хода кристаллизации путем наблюдения в охлажденных лавах и в соответствующих сериях глубинных пород того же района дает много материала в пользу процесса фракционной кристаллизации как контролирующему фактору в развитии тех и других.

Высказывалось предположение о причине очевидного пропуска в серии габбро-гранофир. Допускали, что по временам в телах, обычно небольших размеров, охлаждение происходит с такой скоростью, что фракционирование оказывается в состоянии выделить только два крайних члена и не в состоянии вызвать отделение жидкости на промежуточных стадиях с образованием материала примерно диоритового состава (Боуэн, 1928).

Существует действительно слишком большое стремление ожидать от теории фракционной кристаллизации каких-то фиксированных неизменных правил. Пожалуй, наиболее показательным в этом отношении может служить тот факт, что хотя ход кристаллизации жидкости

с сохранением совершенного равновесия может быть фиксирован совершенно точно, ход изменения состава жидкости при фракционной кристаллизации может варьировать (Боуэн, 1928) в соответствии с ходом фракционирования, в свою очередь изменяющимся в соответствии с контролирующими условиями. Грубо говоря, можно сказать, что если два гранита имеют различный состав, то они должны либо быть извлечены из магм первоначально различного состава, или же если один из них возник из базальтовой магмы путем фракционной кристаллизации, то другой не мог быть получен из той же магмы аналогичным путем.

Соображения Кеннеди и Андерсона (1938) о существовании двух базальтовых слоев интересны и может быть действительно отвечают истине. Возможно, равным образом, что базальт-трахитовая и базальт-риолитовая линии эволюции ведут свое начало из первичного оливинового базальта, кристаллизующегося при различных условиях, причем первая (трахитовая) линия ведет к ограниченному фракционированию на ранних стадиях кристаллизации, при которых происходит только отделение оливина (Боуэн, 1928). Вероятно, нет еще критериев для решения вопроса, и мы можем добавить его к списку тех, в решении которых преобладает неуверенность. Большая гибкость теории фракционной кристаллизации хорошо может быть доказана на примере интересного тела, изученного Вагером и Диром (1939). Они как будто приходят к выводу, что их случай является единственным примером фракционной кристаллизации, забывая, что и в других случаях исследователи проследили в деталях изменение состава фаз, отделяющихся от магмы, и происходящие при этом изменения в составе материнской жидкости, но в этих случаях фазы могли быть другими и последствия процесса также иными.

Не естественно ли было заключить отсюда, что ход фракционной кристаллизации может варьировать и что ферро-габбро не есть единственный возможный продукт фракционной кристаллизации базальтовой магмы. Их пример так близко напоминает результаты, полученные с сухими расплавами в лаборатории, что можно

предполагать, что они имели дело с существенно сухой дифференциацией, обусловленной малой мощностью кровли и ее пористым характером. Тела с более компетентной кровлей в состоянии удерживать свои летучие компоненты и давать гидратные фазы, такие, как роговая обманка и биотит. Это именно те тела, которые обнаруживают в своем составе нормальную естественную дифференцированную серию пород — от базальта до риолита, — легко отличимую от сухих лабораторных серий, к которым приближается пример гренландской интрузии.

Многие петрологи, не отказываясь от той концепции, что базальтовая магма может давать гранитные дифференциаты, тем не менее, для объяснения образования больших гранитных массивов обращаются и к другим процессам. Работы Кеннеди и Андерсона (1938) представляют особенный интерес в этом отношении. Они разделяют все изверженные породы на принадлежащие к вулканической и к плутонической ассоциациям. «Вулканические ассоциации возникают из единой (универсальной) базальтовой магмы (или магм), образующейся при переплавлении базальтовой оболочки земли». «Плутонические ассоциации... возникают... при переплавлении так называемого гранитного слоя». Когда эти авторы переходят к рассмотрению деталей вулканической ассоциации, они указывают на принадлежащие к ней силлы, интрузии и допускают, что дифференциация базальтовой (толеитовой) магмы в состоянии произвести те дифференциаты гранитного типа, которые местами встречаются в составе этих малых интрузий. Граниты орогенических поясов имеют, по их мнению, совершенно другое происхождение и являются типичными представителями плутонических ассоциаций. Им следовало бы включить в свои вулканические ассоциации также и большие габброидные лакколиты с их расслоенными дифференциатами. Эти тела имеют чашеобразную структуру. Однако эта структура обязана своим происхождением главным образом тому обстоятельству, что процессы эрозии вскрыли нижние горизонты (слои) и основание у многих из этих тел. Если бы магма точно того же состава интродировала в области, в которых

орогенические силы могли бы вызвать сводообразное поднятие проникнутых магмой (invaded) пород и если бы дифференциация в них протекала бы точно таким же образом, сопровождаясь в качестве добавочного фактора процессами фильтрационного отжатия, то сомнительно, чтобы эрозия могла когда-нибудь вскрыть нижние части образовавшихся таким образом магматических масс. В крупных телах подобного рода мы можем быть знакомыми лишь с самыми верхними их частями, имеющими состав гранита. Не этими ли причинами объясняется и то обстоятельство, что гранитные тела мы можем наблюдать преимущественно в поясах горных сооружений, а историю процесса их формирования — преимущественно в областях, построенных по типу плато? Необходимо ли тогда предположение о существовании совершенно различных начальных магм, происшедших из различных источников?

Существенной чертой в решении проблемы гранитов, предложенной Кеннеди и Андерсоном и еще, пожалуй, резче подчеркнутой у других авторов, является вопрос о способе, которым гранитная магма должна подниматься из предполагаемого места ее зарождения в доступные ей участки земной коры. Это должно происходить в результате процесса, совершенно отличного от того, при котором происходит внедрение магматических масс в «вулканических ассоциациях», предположительно путем постепенного продвижения вверх гранитной жидкости при процессах замещения вышележащих пород. При представлениях о том, что жидкость может продвинуться на значительное расстояние таким способом, возникают трудности, если мы примем во внимание чрезвычайно важную проблему тепла. Только самые нижние части гранитного слоя, по этой гипотезе, должны быть нагреты до температуры плавления; однако образовавшаяся при этом жидкость должна проникнуть через толщу огромной мощности (очевидно, измеряемую километрами, по некоторым представлениям) вышележащих, относительно холодных пород. Затрата тепла будет колоссальной. Немногим больше доверия вызывает предположение, что гранитная магма (или дифференциаты гранитного состава внедря-

лась активным образом и что те эффекты гранитизации и мигматизации, которые мы наблюдаем в обнаженных массивах, являются результатом этого же процесса.

Необходимость допускать поднятие магмы именно путем такого процесса замещения вытекает, по мнению, например, Рида (1943), как неизбежное следствие при решении «проблемы пространства». Но предлагались, однако, и другие решения этой проблемы. Например, концепция о движении блоков земной коры в вертикальном направлении, вверх и вниз, находит себе достаточно удовлетворительное подтверждение на ряде примеров довольно крупного масштаба. Эти факты были истолкованы и расширены Биллингсом (1945). Не может ли быть, что в тех случаях, когда эти процессы происходят в большом масштабе, сопровождающая их гранитизация (не обязательно совершающаяся в широком масштабе) в конечном счете лишь затемняет тот главный процесс, несущественным спутником которого она является? Не может быть пока дано категорического ответа на этот вопрос, так же как не может быть еще достаточно обоснован и отрицательный ответ.

Можно указать также, что даже окончательное принятие концепции о том, что производная гранитная магма возникает при переплавлении гранитного слоя, вовсе еще не приводит к выводу об «освобождении» гранитов от их обязательной связи (bondage) с родоначальной базальтовой магмой (Рид, 1943, 85). В одной особенности строения земной коры мы полностью уверены — именно в том, что она состоит в основном из мафического материала. Материал гранитного слоя должен был быть, в конечном счете, извлечен именно из этого основного материала. Каждый волен выбирать любой другой способ дифференциации, который он предпочтет, если он не имеет склонности к кристаллизационной дифференциации; но обязательная связь (bond) с базальтовой магмой все равно будет оставаться. Образование гранитной магмы путем переплавления (древних) гранитов только отодвигает нашу проблему к туманному прошлому.

### ГРАНИТИЗАЦИЯ, МИГМАТИЗАЦИЯ, ПАЛИНГЕНЕЗ

Существуют, разумеется, и такие авторы, которые при объяснении образования гранита «расправляются» с гранитной магмой в любом смысле этого слова. Граниты производятся полностью путем гранитизации, причем действующие эманации собственно не поднимаются ниоткуда, но представляют просто как бы «пот земли». Есть и другие, о которых нельзя сказать, что они полностью разделяют такой взгляд, хотя как будто и склоняются временами к нему. Рид (1943, стр. 91) заявляет: «Из центральной части поля гранитизации исходят волны метасоматизирующих растворов, изменяющих свой состав и температуру по мере того, как они удаляются от ядра и вызывают образование метаморфических зон вокруг последнего». Почти каждый геолог принимает это утверждение, по крайней мере взятое само по себе. Многие считают, однако, что в центре необходимо должен располагаться гранит, образовавшийся в результате процессов, совершенно независимых от тех метаморфических явлений, которые он сам вызывает.

Мощное продвижение кнаружи волн растворов приводит многих исследователей к необходимости искать более основательные причины, определяющие локализацию центра действия, не ограничиваясь только погружением материала во все более и более глубокие зоны или же вековым накоплением радиоактивного тепла. Они склоняются к концепции, что активное внедрение действительной (я употребляю это слово со страхом и дрожью) гранитной магмы создавало совершенно особые, ненормальные условия в окружающей среде.

Одной из неудачных особенностей президентских обращений является то, что в них редко содержится элемент новизны. Вероятно, мало кто из моих слушателей сомневается в моих собственных склонностях по затронутым мною вопросам. Но может быть, не предполагали, что я допускаю возможность для гранитной магмы быть продуктом переплавления гранита (Боуэн, 1928, стр. 319) или селективного переплавления геосинклинальных осадков. Для тех, кто верит в то, что и лабораторные, и полевые данные согласно указывают

на образование гранитной жидкости в качестве позднекристаллического остатка при фракционной кристаллизации поликомпонентной системы из породообразующих окислов, у тех гипотеза о том, что гранитная жидкость может быть равным образом также и продуктом селективного плавления соответствующего материала, вряд ли встретит сочувственный прием. На тех уровнях, которые доступны нашему наблюдению, я ожидал бы, что процесс будет стимулироваться необычным избытком тепла в результате интрузии магмы. Гранитизация окружающих пород с этой точки зрения была бы второстепенным, сопровождающим процессом.

Явления замещения, совершающиеся в больших масштабах, при которых породы широко варьирующего характера приобретают гранитный состав и содержат лишь тени прежних структур, представляют трудную проблему для объяснения, какие бы ни были сделаны при этом допущения (Квирке, 1927, Гудспид, 1939, Гроут, 1941). Растворение огромных количеств мафического материала, которое должно было бы иметь место, как будто бы лежит за пределами возможностей для остаточной жидкости гранитной магмы. Последняя могла бы иметь силу, достаточную только для изменения, но не для растворения этого материала. Конденсированные кислые пары, отогнанные от этих жидкостей, могли бы быть более способными к этому (Боуэн, 1933) и возможно, что эманации, исходящие из магмы, выталкиваются в некоторых случаях под влиянием интерстиционной жидкости интродуцированных пород, в которых активная циркуляция и способность их к замещению усиливаются под влиянием тепла интрузива. Для тех случаев, когда интродуцируемые породы являются осадочными, содержащими промежуточную (интерстициальную) жидкость, богатую ионами хлора, острота проблемы растворения и переноса больших количеств извести, магнезии и железа значительно смягчается.

Может возникнуть и действительно был поставлен вопрос (Лаусон, Lawson, 1914) о том, обязательно ли являются метаморфические ореолы вокруг интрузивов указанием на большое отделение летучих из интрузива, как это иногда полагают. Не может ли значительная

часть наблюдаемых изменений быть обязанной усиленной циркуляции вод, заимствованных из боковых пород?

Имеется и другое соображение; в случае развития гранитизированных ореолов, в обычно принимаемой концепции, растворы, отделяющиеся от гранита, несут с собой широко варьирующие (по составу) негранитные компоненты гранитизированных боковых пород, расходящиеся по направлению вверх и в стороны от активного центра. Однако, мы обычно затрудняемся указать место, к которому транспортировался материал (главным образом мафический). Он обычно отсутствует, и мы допускаем, что он был вынесен вверх. А не мог ли он исчезнуть в направлении книзу?

Такой процесс мог быть даже более вероятен при образовании гранитной магмы путем частичного переплавления древних гранитов или при селективном плавлении осадочного материала соответствующего характера. Предположим, что мы имеем массу осадочных пород, которая в результате глубокого опускания и перекрытия вышележащими толщами достигла области таких температур, при которых гранитные компоненты вместе с водой образуют жидкость, выполняющую ячейки «губки» из кристаллического материала (Эскола, 1932, стр. 473), имеющего частью мафический характер. В таком массиве, находящемся в гравитационном поле земли, энтропия всей системы будет увеличиваться, если тяжелые компоненты будут передвигаться книзу и легкие—кверху (по отношению друг к другу). Таким образом, мы будем ожидать стремления к увеличению энтропии, которое будет проявляться в концентрации жидкости ближе к верхней части и кристаллов—ближе ко дну рассматриваемой массы. Предполагается, что относительное количество жидкости слишком мало для того, чтобы могло происходить свободное падение кристаллов, и нужно поэтому предполагать совсем другой способ осуществления взаимного перемещения. Если мы сосредоточим внимание на двух кристаллах, из которых один находится в контакте с жидкостью, а другой, рядом находящийся, принадлежит к той же самой фазе, но расположен немного ниже первого, то в гравитационном поле должно существовать потенциальное

стремление у верхнего кристалла войти (погрузиться, опуститься) в раствор, осесть на кристалл, находящийся ниже. Пусть эта пара кристаллов будет членами вертикально расположенной серии и тогда окажется, что продолжительное действие процесса такого рода приведет в результате к концентрации жидкости в верхней части и кристаллов — ближе ко дну и, кроме того, к тенденции для наиболее тяжелого кристаллического материала к переносу книзу, притом более охотно, чем у более легкого материала. Таким образом мы можем ожидать тенденции к образованию массы с гранитной жидкостью в ее верхней части, нерасплавленного более легкого кристаллического материала в общем гранитного состава — непосредственно ниже (под ней), и более мафического кристаллического материала — еще ниже. Все это может происходить без крупных (*bodily*) перемещений, но скорее путем процессов метасоматического характера, и масса может предположительно еще сохранять реликты своей первоначальной осадочной текстуры.

Этот процесс, таким образом, приводит к относительно движению, перемещению жидкости и кристаллов в массе, подвергающейся частичному переплавлению, но без общего направленного вверх движения по отношению к окружающим холодным (*superincumbent*) стенкам. Это тот процесс, который может быть предложен для объяснения образования многих гранитизированных тел, описанных в литературе и в отношении которых было признано, что они поднимались на большие расстояния через земную кору при процессах замещения. В действительности рост всей массы в направлении кверху при каком-либо процессе подобного рода должен рассматриваться как процесс весьма ограниченный вследствие тесно связанной с этим проблемы тепла. Этим не предполагается, что место, где происходит переплавление, не может в результате этого процесса медленно перемещаться кверху, скажем, при нарастании нагрузки в геосинклинали, но это будет нечто совершенно отличное от процесса тесного проникновения гранитной жидкостью мощной толщи холодных вышележащих пород, простирающихся далеко в зону, где даже

начальные (incipient) фазы переплавления трудно себе представить.

Гранитная жидкость, накопившаяся в результате вышеописанного процесса в верхней части зоны переплавления, всегда, разумеется, будет иметь потенциальную возможность к внедрению, которая может реализоваться при соответствующих условиях.

С другой стороны, гранитная масса, являющаяся действительным интрузивом, в том смысле, что она может насильственным образом занять известное положение, на последних стадиях своей кристаллизации может развиваться не только внутри себя, но также и в ореоле окружающих пород, т. е. в обстановке, весьма близкой к той, которая была только что обрисована для селективного плавления массы. Тут может иметь место то же самое относительное перемещение жидкости и кристаллов под влиянием того же самого процесса, и мафический материал гранитизированного ореола может, возможно, даже двигаться книзу, вместо того чтобы двигаться кверху и кнаружи, как это обычно предполагается.

Значительная часть непосредственно предшествовавшего обсуждения имеет только косвенную связь с магмой, по крайней мере в обычном значении этого термина. Было бы уместно, однако, отметить тот факт, что скандинавские геологи, которые дали нам идею об ихоре, как о среде, в которой происходил перенос материала и может быть шло зарождение некоторых магматических формаций, вынуждены теперь (по крайней мере некоторые из них) расстаться даже с этим способом переноса флюидов, для отдельных случаев. Они скорее склоняются к идее о перемещениях ионов в кристаллических решетках, разрывающих свои связи, мигрирующих в промежутках между зернами и вызывающих перераспределение материала в широком масштабе без участия жидкостей какого-либо рода (Рамберг, Ramberg, 1944, стр. 109). Возможно, что это не более как новый способ формулировки того положения, что при умеренно высоких температурах минералы горных пород имеют заметное давление паров, предположение, которое было давно сделано, чтобы объяснить наряду с другими явлениями

ошлакование силикатов в лабораторных условиях, но до сих пор не было привлечено для объяснения таких широких процессов. Мы говорим об «экспансивных южанах», но в действительности мы должны обратиться к «флегматичным северянам» для того, чтобы решить некоторые наши геологические проблемы.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- Adams L. H. and Gibson R. E., The compressibilities of dunite and of basalt glass and their bearing on the composition of the earth, *Nat. Acad. Sci., Pr.*, **12**, 275, 1926.
- Adams L., Williamson E. D., The compressibilities of minerals and rocks at high pressures, *Franclin Inst. Journ.*, **195**, 475, 1923.
- Benson W. N., The tectonic conditions accompanying the intrusion of basic and ultrabasic igneous rocks, *Nat. Acad. Sci. Mem.* **11**, 1-90, 1926.
- Billings M., Mechanics of igneous intrusion in New Hampshire, *Am. Jour. Sci.*, **243A**, 40-68, 1945.
- Bowen N. L., The evolution of the igneous rocks, *Princeton Univ. Press*, 1928. Русск. перевод, 1934.
- Bowen N., The broader story of magmatic differentiation, briefly told, in «Ore deposits of the Western States» (Lindgren Volume), *Am. Inst. Min. Metall. Eng.*, 1933.
- Bowen N., Mente et malleo atque catino, *Am. Mineral.*, **23**, 130, 1938.
- Bowen N. and Schairer J. F., Grunerite from Rockport, Massachusetts, and a series of synthetic fluor-amphiboles, *Am. Mineral.*, **20**, 543-551, 1935.
- Buddington A. F., Some petrological concepts and the interior of the earth, *Am. Mineral.*, **28**, 119-140, 1943.
- Daly R. A., Igneous rocks and the depths of the earth., *Mc-Graw Hill*, New York, 1933. Русск. перевод, 1935.
- Daly R. A., Nature of the asthenosphere, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **57**, 707-726, 1946.
- Eskola P., On the origin of granitic magmas, *Min. Pet. Mitteil.*, **42**, 455-481, 1932.
- Gilluly J., The water content of magmas., *Am. Jour. Sci. Sth. ser.*, **33**, 430-441, 1937.
- Gisolf W. E., On the rocks of Doormantop in Central New Guinea, *Kon. Acad. Wetten. Amsterdam, Pr.*, **26**, 195-197, 1923.
- Goodspeed G. E., Pre-Tertiary metasomatic processes in the southeastern portion of the Wallowa Mountains of Oregon, *1-th Pacific Sci., Cong., Pr.*, 399-422, 1939.
- Grout F. F., Formation of igneous-looking rocks by metasomatism: A critical review and suggested research, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **52**, 1525-1576, 1941.
- Hess H. H., A primary peridotite magma, *Am. Jour. Sci. Sth. ser.*, **35**, 321-344, 1938.

- Holmes A., The origin of igneous rocks, *Geol. Mag.*, **69**, 543, 1932.
- Hubbert M. K., Strength of the earth., *Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, **29**, 1630—1653, 1945.
- Kennedy W. Q. and Anderson E. M., Crustal layers and the origin of magmas, *Bull. Volcanologique, serie II*, **3**, 24—82, 1938.
- Langmuir I., Science, common sense and decency, *Science*, **97**, I, 1943.
- Lawson A. C., Is the Boulder «batholith» a laccolith? *Univ. Calif. Geol. Dept. Bull.*, **8**, 13—14, 1914.
- Michelson A. A. and Gale N. G., The rigidity of the Earth, *Journ. Geol.*, **27**, 585—601, 1919.
- Phemister T. C., The role of water in basaltic magma. *Tschermak's Min., Pet. Mitteil.*, **45**, 19—77, 99—132, 1934.
- Quirke T. T., Killarney gneisses and migmatites., *Geol. Soc. Am. Bull.*, **38**, 753—766, 1927.
- Ramberg H., The thermodynamics of the earth's crust, I. Preliminary survey of the principal forces and reactions in the earth's crust, *Norsk, Geol. Tidsskr.*, **24**, 98—111, 1944.
- Read H. H., Meditations on granite, *Geol. Assoc. Pr.*, **54**, 64—85; **55**, 45—93, 1943—1944 (наст. сборник).
- Read H. H. in discussion of paper by T. C. Phemister «The Coast Range batholith near Vancouver, British Columbia», *Geol. Soc. London, Quart. Jour.*, **101**, 37—88, 1945.
- Shapley H., On the astronomical dating of the earth's crust, *Am. Jour. Sci.*, **243A**, 516, 1945.
- Sosman R. B., Evidence on the intrusion-temperature of peridotites, *Am. Jour. Sci.*, 5th ser., **35A**, 353—359, 1938.
- Wager L. R. and Deer W. A., The petrology of the Skaergaard intrusion, Kangerdlugssuag, East Greenland, *Med. om Gronland*, **105**, 4, 1939.
- Weizsäcker C. F., *Zeits. Astrophys.*, **22**, 319, 1941; reviewed by S. Chandreselhar, *Reviews of Modern Physics*, **18**, 94, 1946.

Х. РИД

## РАЗМЫШЛЕНИЯ О ГРАНИТЕ

Н. Н. READ

MEDITATIONS ON GRANITE

*Proceedings of the Geologists' Association*, Part One, 54, 64—85  
1943; Part Two, 55, 45—93, 1944.

ЧАСТЬ I

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня я предлагаю вам рассмотреть со мной «этот вопрос о гранитах» и, если у нас будет время, я хочу попросить у вас год для того, чтобы подготовиться к рассмотрению непосредственно связанной с этим вопросом проблемы гранитизации. Я должен предупредить, что те из присутствующих, которые хотели бы получить энциклопедическое определение гранита, не найдут его на этих страницах. Я умышленно дал такое название моему докладу — это *размышления*, а не новый вклад в наши знания по этому вопросу. Признаюсь, я обобщаю их главным образом для самого себя. В этом году мои размышления затрагивают следующие вопросы: как различные авторитеты определяют гранит? Что думали о гранитах некоторые классики геологии? Что думают о гранитах современные ученые? Можно считать, что значительная область рассматриваемой темы осталась не освещенной, в то время как отдельные детали разобраны с особой тщательностью. Но уж такова сама природа размышлений.

Я надеюсь, что никого не обижу, если рискну сказать, что большинство членов геологической ассоциации более компетентно в стратиграфической и палеонтологической отраслях геологии, нежели в петрологии и метаморфизме, и что только немногие из присутствующих, выражаясь словами Хеттона, «особенно заинтересованы этим вопросом о гранитах». Я поэтому умышленно выбрал тему о гранитах и гранитизации для того, чтобы дать вам сведения о различных взглядах по этому

вопросу. Это разнообразие во взглядах может не чувствоваться геологами, которым не приходилось наблюдать развитие петрологии в течение последнего времени и, с другой стороны, оно может оказаться неожиданным для тех, кто воспитан на ортодоксальных учебниках. Если мне позволит время, я хочу рассмотреть сегодня вопрос о происхождении гранитов и думаю, что в результате буду вознагражден появлением у вас чувства, что здесь дело обстоит далеко не благополучно. В некоторых областях новые идеи не имеют ничего привлекательного в своей новизне. Однако для нас необходимо изучить все, и старые и новые идеи, которые относятся к интересующей нас теме. Мы не можем действовать по указке, ограничивая наш выбор.

В этом духе поэтому мы должны изучить представления о происхождении гранитов, и если кто-либо будет расположен к нашей точке зрения, мы ниже изложим наши взгляды по этому предмету.

### СОВРЕМЕННЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИТА

До начала было бы хорошо попытаться выяснить основные черты современных взглядов на то, что собой представляет или должен представлять гранит. Это нужно для того, чтобы выяснить, выражаясь логическим термином, что является «существенными, отличительными признаками» гранита. Я собрал мнения, которые имеются по этому вопросу в следующем ниже подборе новейших руководств. По общему мнению, многие руководства оказываются устаревшими тотчас же после их издания, однако эти руководства, хотя и недостаточные для специалиста, являются тем не менее источником основных авторитетных сведений для большинства интересующихся этим вопросом. Отсюда мы, таким образом, получим беспристрастное представление о новейшем общепринятом взгляде и будем в состоянии показать «существенные отличительные признаки» гранита или, как мы по крайней мере надеемся, показать то, что является общим для некоторых его отличительных признаков. Таким образом, мы можем приступить к рассмотрению определений гранита, которые даны «Новым

английским словарем», «Британской энциклопедией» и английскими учебниками, затем американскими учебниками, наконец, некоторыми учеными на континенте.

«Новый английский словарь» дает следующее определение гранита:

«Это кристаллически-зернистая порода, состоящая в основном из кварца, ортоклазового полевого шпата и слюды; в большом количестве употребляется в строительстве».

В 14-м издании «Британской энциклопедии» (1929 г., 10, 636) гранит определен как:

«Групповое название для семейства плутонических или глубинных кислых изверженных пород, характеризующихся в основном присутствием кварца, полевого шпата (ортоклаза, микроклина, пертита, редко анортклаза, кислого плагиоклаза) и некоторых железо-магнезиальных минералов (слюды, амфибола и пироксена).

Граниты являются обычно породами полнокристаллическими и обладают типичной гипидиоморфнозернистой или неправильнозернистой (гранитоидной) структурой. Название происходит от латинского слова *granum* — зерно».

Далее там же (10, 670) сказано:

«Гранит образуется в результате затвердевания жидкости при высокой температуре и высоком давлении».

А. Холмс<sup>1</sup> определяет гранит так:

«Явнокристаллическая (фанерокристаллическая) порода, состоящая в основном из кварца и щелочного полевого шпата с какими-либо из следующих минералов: биотита, мусковита, амфибола, и пироксена».

Холмс считает, что термин «фанерокристаллическая» относится к изверженным породам, в которых все кристаллы главных минералов могут быть различимы невооруженным глазом».

В «Петрологии для студентов» А. Харкера<sup>2</sup> плутонические изверженные породы включают в себя граниты, которые представляют собой

«равномернозернистые, полнокристаллические породы, состоящие из одного или более щелочных полевых шпатов, кварца, некоторых железо-магнезиальных минералов и, кроме того, аксессуариев. Порода

<sup>1</sup> A. Holmes, *Nomenclature of Petrology*, 1920.

<sup>2</sup> A. Harker, *Petrology for Students*, 5th Ed., 1919.

обычно средне- или, скорее, крупнозерниста, а тенденция главнейших кристаллов мешать свободному росту своих соседей дает то, что Розенбуш называет гипидиоморфно-зернистой структурой».

Хатч и Уэллс<sup>1</sup> устанавливают:

«Кислые plutonic породы включают в себя то, что обычно называют «гранитами». Структура гранитов типично гипидиоморфно-зернистая, т. е. такая, в которой составляющие минералы являются равновеликими и в главной своей массе лишены кристаллографических граней; каждое зерно имеет неправильную границу с своим соседом».

Обращаясь к американской литературе, мы находим авторитетное определение А. Джохансена<sup>2</sup>, что граниты являются

«глубинной породой, состоящей из кварца, калиевого полевого шпата, меньшего количества натрового полевого шпата (олигоклаза или андезина) и одного или более биопироболов (т. е. биотита, пироксена, амфибола). Порода мегаскопически зернистая».

Другие американские определения, например, данные четверьмя авторами: Кроссом, Иддингсом, Пирсоном и Вашингтоном (Cross, Yddings, Pirsson, Washington), а также Кларком (Clarke), сходны с тем, которое дал Джохансен. Более расширенное определение, касающееся структуры гранитов, дает Иддингс<sup>3</sup>:

«Структура гранитов голокристаллическая или фанерокристаллическая, строение обычно зернистое; в одних случаях равномерное, в других неравномерно-зернистое и полосчатое (sariate) и в третьих такситовое и порфировидное».

Обычное немецкое определение мы находим у Розенбуша<sup>4</sup>: гранит представляет собой голокристаллическую plutonic изверженную породу, а семейство гранитов определяется следующим образом:

«Все члены семейства гранитов обладают гипидиоморфно-зернистой структурой, нередко переходящей в порфировидную и характеризуются сочетанием кварца и щелочного полевого шпата... Характерная комбинация щелочного полевого шпата и кварца сопровождается минералами семейства слюд, амфиболов и пироксенов».

<sup>1</sup> A. Hatch and Wells, *Petrology of the Igneous Rocks*, 1937.

<sup>2</sup> A. Johansen, *Descriptive Petrology of the Igneous Rocks*, I, 254, 1939.

<sup>3</sup> Iddings, *Igneous Rocks*, I, 352, 1909.

<sup>4</sup> H. Rosenbusch, *Elemente der Gesteinslehre*, 104—105, 1923.

В качестве примера определений, даваемых французскими авторами, мы можем привести формулировку Лаппарана<sup>1</sup>. Гранит является эруптивной породой и

«состоит из нескольких составных частей, в основном из кварца и щелочного полевого шпата, обычно в сочетании с третьим минералом, слюдой, амфиболом или пироксеном, к которым в большинстве случаев присоединяется известково-натриевый полевой шпат.

Для гранита типична зернистая структура, в которой главные зерна настолько крупны, что могут быть определены невооруженным глазом».

Из этих кратких примеров выясняется общее мнение, которое может быть выражено следующим образом:

*Гранит есть глубинная, изверженная (или эруптивная) порода, состоящая из кварца, щелочного полевого шпата и железо-магнезиального минерала, — биотита, амфибола, или пироксена, — в зернах, достаточно крупных для рассмотрения простым глазом, и обладающая структурой, которая получается в результате того, что кристаллы при своем росте мешают друг другу свободно развиваться.*

Следует отметить, что в этой формулировке, которую мы принимаем как общепринятую, все же остается некоторая неопределенность в отношении прилагательных *изверженные* (igneous, буквально огненные) и *эруптивные* (eruptive)<sup>2</sup>. Ниже будет показано, что британские и американские авторы употребляют термин *изверженные* (igneous), а континентальные — *эруптивные*. Нам нужно выяснить, является ли такое употребление случайным и эти два термина эквивалентны друг другу, или же они являются существенно различными по своему смыслу и имеют каждый самостоятельное значение. Этот вопрос никоим образом не является малозначимым, как это может показаться с первого взгляда, и мы должны

<sup>1</sup> J. de Lapparent, *Leçons de Petrographie, 140—141, 1923.*

<sup>2</sup> igneous — обозначает буквально *огненные*; вообще же в английской геологической номенклатуре это прилагательное соответствует русскому прилагательному *изверженные*, которое имеет совершенно другой первоначальный смысл, соответствующий в буквальном переводе английскому и международному термину eruptive — *эруптивный*.

О предпочтительности того и другого термина Рид говорит ниже. (*Прим. перев.*)

признать, что дискуссия по этому поводу приведет нас к самому существу вопроса о гранитах. Мы должны подойти к этому вопросу с целью проверки мнений некоторых основателей нашей науки и продолжить его рассмотрение в современном развитии.

### ХЕТТОН, ЛЯЙЕЛЬ, КЛИФТОН УОРД, А. Х. ГРИН

Я вполне признаю тот очень большой вклад, который был сделан в развитие петрогенетической мысли небри-танскими авторами, и если я останавливаюсь преимуще-ственно на наших отечественных классиках, я это де-лаю не потому, что недооцениваю работы зарубежных ученых.

Здесь нет надобности проследивать ход классиче-ского спора конца 18-го столетия между нептунистами, которые учили, что, например, граниты были химиче-скими осадками, и плутонистами, которые считали, что граниты застывали из расплава. Читатели, желающие получить удовольствие и оживить в памяти характер и взгляды двух ведущих шотландских антагонистов, выра-женные в полемике нептуниста Джемсона с крупнейшим из всех плутонистов — Джемсом Хеттоном, могут най-ти это в главе «Геология», написанной Е. Б. Байлеем и Д. Тейтом в сборнике «Роль Эдинбурга в развитии науки»<sup>1</sup>. Позиция нептунистов может быть сформули-рована следующими словами Ляйеля<sup>2</sup>: «Согласно первоначальной теории нептунистов, все кристаллические формации были осаждены из универсального раствори-теля или хаотической жидкости еще до появления жи-вотных и растений. Нестратифицированные граниты, будучи отложены первыми, послужили как бы фунда-ментом или основанием, на котором могли лежать гнейсы и другие стратифицированные породы». Хеттон, с другой стороны, «стал учить, что граниты, так же как и траппы, имели изверженное происхождение и в различные периоды внедрялись в жидком состоянии в различные части земной коры»<sup>3</sup>. Прежде чем рассматривать ту

<sup>1</sup> E. B. Bailay, D. Tait, *Edinburgh's place in scientific Pro-  
gress*, 1921.

<sup>2</sup> Lyell, *Principles*, 12-е изд., 138, 1875.

<sup>3</sup> Lyell, *Elements*, 268, 1838.

часть хеттоновской теории, которая касается моей настоящей темы, я убедительно прошу геологов прочитать или перечитать труд Хеттона «Теория Земли». Доктрина Хеттона заключается в следующем: «Что бы ни считалось работой растворяющей воды и ее химическим воздействием на материалы, скопляющиеся на дне моря, затвердевание этой массы земли и перемещение ее в атмосферу выше уровня моря является непосредственным результатом действия огня или горячего плавления и расширения тел».

Хеттон считал, что для «затвердевания» рыхлого терригенного материала, осаждавшегося на дне моря, было необходимо жидкое состояние, которое могло быть получено только от нагрева или от растворения, т. е. от огня или от воды. Вода не может служить причиной консолидации слоев, в то время как может быть показано, что «весь материал земли» был когда-то в расплавленном состоянии (там же, т. I, стр. 34—49). Кроме того, «чуждый материал может быть внедрен в открытую слоистую структуру в виде паров или экзгаляций, а также в жидком состоянии расплава» (там же, т. I, стр. 49—50). Среди «ископаемых» «fossils», доказывающих существование этого расплава, Хеттон указывает кремень, кремненную древесину, карбонный железняк, агат и оолитовый известняк (там же, стр. 59—103). Образование рудных и жильных минералов он объясняет «значительной интенсивностью подземного огня и жара и достаточно значительным сжатием этих тел, которые подвергаются сильному нагреву, без окисления или другого изменения (там же, стр. 64—66). В середине этого «доказательства» Хеттон замечает: «Место минеральных преобразований не на поверхности земли; и мы не должны ограничивать природу нашим слабым разумением или оценивать силы природы нашими масштабами» (там же, стр. 94).

Рассматривая образование отдельных тел и общую консолидацию осадков и «тех тел, которые оказались таким образом затвердевшими путем расплавления», Хеттон переходит к вопросу о граните — «массе, которая обычно не стратифицирована и которая, будучи совершенно твердой и образующей некоторую часть земной

коры, заслуживает рассмотрения» (там же, стр. 104). При рассмотрении письменного гранита из Портсой Банфшайр (Portsoy Banffshire), он доказывает, что «шпат (т. е. полевой шпат) и кремнезем (т. е. кварц) были смешаны друг с другом в жидком состоянии (стр. 106) и что породы могли быть образованы из застывания этой жидкости» (стр. 107). Он заключает: «На основании всего этого, следовательно, будем ли мы рассматривать граниты как слой или как беспорядочную массу, как скопление некоторых материалов или как выделение вещества, которое было раньше смешанным с другими, наблюдения ясно доказывают, что это вещество непосредственно затвердело из расплава и не образовалось никаким иным путем» (там же, стр. 109).

«Поднятие земной коры обусловлено тем же агентом, который вызывает и отвердевание слоев, т. е. материи, активизированной очень сильным жаром... и расширяющейся с исключительной силой. Часть этой расширяющейся материи находится в конденсированном виде в телах, нагретых *огненными* парами» (стр. 129—130); таким образом образуются минеральные жилы.

Это употребление термина *огненные* (*igneous*; курсив мой выше и ниже) сходно по смыслу с употребляемыми Хеттоном терминами *огонь*, *пламя* (*fire*) и горение (*burning*). Огонь является причиной жидкого состояния лавы и мрамора (стр. 142), вулкан представляет собой горящую гору (стр. 149), «созданную не для того, чтобы наводить страх на суеверных людей и возбуждать в них приступы набожности и благочестия и не для повержения в прах благочестивых городов: вулкан следует рассматривать как отдушину подземного очага, созданную для предохранения от чрезмерного поднятия страны и от землетрясений, которые фатально за ним следуют» (стр. 146).

Так как граниты меняются по своему составу и структурам, Хеттон считает, что они не могут находиться «в том состоянии, в котором они были сотворены первоначально, поскольку в противном случае пришлось бы считать, что природа здесь действовала бесконечным разнообразием путей без той последовательности и мудрости, которые мы находим во всех ее творениях, ибо

это были бы изменения без принципов и вариации без цели» (стр. 313). Этот отрывок в сжатой форме дает нам представление о взгляде Хеттона на безупречный характер «земной машины».

Поэтому гранит не может иметь права на старшинство (во времени) по отношению, например, к кристаллическим сланцам; он образовался «так же как и все другие напластованные и отвердевшие породы; таким образом скопление различных материалов и последующее плавление этой сложной массы является необходимыми операциями для образования всех твердых масс земли» (стр. 319). Вы видите, что некоторые из современных «еретических идей» имеют, повидимому, самое почтенное происхождение.

Хеттона укрепляет в этом заключении следующая ниже цепь фактов: ясно, что «собственно лавы», или «излившиеся лавы» (стр. 156) были в расплавленном состоянии; почти ясно, что базальтовые дайки и пласты являются «неизлившимися» (т. II, стр. 508) или подземными лавами (т. I, стр. 154); «плотные покровы или базальты, в конце концов, переходят в гранит» (стр. 316), а гранит в свою очередь переходит в порфир (стр. 317). Из этих явлений можно сделать законный вывод, что «гранит и основная порода, или базальт, хотя и имеют каждая особый состав, таким образом переходят одна в другую; и основная порода, и порфир являются, без сомнения, разновидностями лавы и можно считать, что гранит, который мы встречаем в виде такой же, лишенной стратификации массы, как и основная порода, — базальт или шведский трапп, был в недрах земли жидким и образовался благодаря перемещению жидкой массы, не имея какой-либо собственной формы» (стр. 317).

Этот вывод, что гранит «в отношении возможности течения мог рассматриваться в качестве аналога базальта или не вышедшей на поверхность лавы» (т. III, стр. 13), был наиболее убедительно подкреплён взаимоотношениями гранита и известняка в Глен-Тилте (Glen Tilt), где гранит образует ясные жилы в боковых породах. Порфиновые «интеръекции» (interjection) также наблюдались Хеттоном и, описывая дайки «основных трапп-

пов и базальтов» Мидлэндской долины (Midland Valley) в Шотландии, он определяет базальт как разновидность гранита, содержащую железорудное вещество (т. III, стр. 24—25). Сравнивая эти тела с дайками и силлами гранита и порфира, которые он наблюдал в Хайлэнде (Highland), Хеттон делает вывод, что эти последние, «повидимому, находились в таком же жидком состоянии, как и базальт» (стр. 24—25). После суммирования своих наблюдений над контактами Галлоуэйского (Galloway) гранита он заключает: «И без того, чтобы действительно видеть гранит в жидком состоянии, мы имеем все указания на возможность этого факта, т. е. факта течения гранита в расплавленном виде, среди осадочных пластов, разбитых подземными силами» (т. III, стр. 60).

Большая часть этих заключений Хеттона, конечно, мало обоснована, однако нужно помнить, что мы рассматриваем только одну небольшую часть его учения. Как заметили Байлей и Тейт, «время, которое подточило основание, оставило нетронутой значительную часть надстроек его системы». Поскольку это касается нашего исследования, мы можем видеть, что Хеттон объединял гранит, порфир, основную породу, трапп и базальт в одну категорию и интерпретировал их как продукты затвердевания материи, которая сделалась жидкой благодаря нагреву.

Следует отметить, что прилагательное «огненные» (igneous) очень редко употреблялось Хеттоном. С другой стороны, рассмотрение первого издания «Основ» Ляйеля показывает, что в 1830 г. этот термин сделался излюбленным. Ляйель<sup>1</sup> делит огненные силы на вулканы и землетрясения и в описаниях вулканов он пользуется в бесчисленном количестве случаев такими специфически «огненными» выражениями, как огонь, горение, пламя и дым. Он цитирует соответствующие строки римского поэта:

«Nec quae sulfureis, ardet fornacibus Aetna  
Ignea semper erit, neque enim fuit ignea semper»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Lyell, Principles, 1, 312, 1830.

<sup>2</sup> Не будет всегда гореть дышащая серой Этна, ибо не всегда она была огнедышащей.

Ляйель заключает, что огненные (изверженные) породы «несомненно, являются продуктами действия огня»<sup>1</sup>.

Употребление «огненных» терминов продолжается даже в 12-м издании (1875) «Основ». Однако еще в 1835 г. Ляйель сделал следующую предостерегающую вставку: «Когда при описании вулканических явлений применяются выражения «пламя» и «дым», они должны, вообще говоря, пониматься фигурально»<sup>2</sup>.

Для нашей настоящей цели первоначальные воззрения Ляйеля на граниты имеют большой интерес. Перед тем как войти в темную и туманную область первородных пород, к которым он относил и гранит, Ляйель еще раз останавливается на надежной почве двух других больших классов пород. Его положения по этому вопросу заслуживают рассмотрения:

«Кроме этих слоев водного происхождения мы находим другие породы, в которых мы сразу можем узнать продукты огня, так как они в точности похожи на породы, образованные вулканами и в новейшие времена. Таким образом, мы сразу устанавливаем две отличных группы минеральных масс, составляющих земную кору: осадочную и вулканическую»<sup>3</sup>.

В 1-м издании «Элементов», в 1838 г. на стр. 4—5 Ляйель снова разделил породы на 4 крупных класса, а именно: на водные, вулканические, плутонические и метаморфические. «В первые два подразделения входят водные и вулканические породы или продукты водной и огненной деятельности». Я хотел бы обратить внимание на более или менее ясно выраженное суждение, что изверженные породы представлены лавами и тесно ассоциирующими с ними дайками<sup>4</sup>.

В терминологии Ляйеля «первичные породы» включают в себя метаморфический и плутонический разделы его четверной классификации. Плутоническими породами являются нестратифицированные первичные породы, «в наибольшей своей части состоящие из гранита и пород, весьма близких к граниту», «образовавшиеся благодаря

<sup>1</sup> Principles, 1-е изд., 3, 4, 1833.

<sup>2</sup> 4-е изд., 2, 137, 1835.

<sup>3</sup> Principles, 3, 10, 1833.

<sup>4</sup> Elements, 1-е изд., 11—13, 1838.

действию огня на больших глубинах»<sup>1</sup>. Факты, на которых основано это расширение группы изверженных (огненных) пород, можно рассмотреть более детально.

Во-первых, жилы и дайки гранита пронизывают боковые породы, как это хорошо описано Хеттоном, Мак-Кулохом (MacCulloch) и многими другими; совершенно такие же жилы и лавовые дайки, например на Этне<sup>2</sup>, образуют явные «каналы, по которым проходят лавовые струи»<sup>3</sup>. Такие дайки, вероятно, на большой глубине соединяются с остальными массами изверженной породы<sup>4</sup>. И гранит, и лава (т. е. материал даек) дают те же изменения во вмещающих породах<sup>5</sup>. Отсюда следует, что оба типа пород образовались одним и тем же путем, а именно в результате затвердевания горячего расплава.

Во-вторых, известны многочисленные переходы от гранита к «различным типам бесспорно вулканических пород, так что если последние имеют огненное происхождение, то едва ли возможно отрицать, что и граниты образовались таким же способом»<sup>6</sup>. Среди примеров таких переходов, упоминаемых Ляйелем, находятся случаи, приводимые Мак-Кулохом из Абердиншайра (Aberdeenshire) и Шетлэнда (Shetland), где граниты, повидимому, «совершенным способом переходят в базальт»<sup>7</sup>.

Ляйель делает вывод, что граниты, будучи более кристаллическими и не обнаруживая туфов, брекчий и миндалин, образовались под «очень большим давлением вышележащей массы и исключают соприкосновение с воздухом и водой»<sup>8</sup>. Поэтому граниты являются плутоническими породами<sup>9</sup>. Плутонические породы являются именно тем, что должно получиться в результате кристаллизации расплавленного вулканического материала на больших глубинах. Рельеф земной поверхности недостаточно расчленен, чтобы дать возможность наблю-

<sup>1</sup> Principles, 3, 353, 1833.

<sup>2</sup> Elements, 1-е изд., 12, 1838.

<sup>3</sup> Principles, 12-е изд., 2, 16, 1875.

<sup>4</sup> Elements, 172, 1838.

<sup>5</sup> Elements, 15, 1838.

<sup>6</sup> Elements, 15, 1838.

<sup>7</sup> Elements, 204, 1838.

<sup>8</sup> Principles, 1-е изд., 3, 361, 1838.

<sup>9</sup> Elements, 16, 1838.

дать полный переход от вулканической к плутонической породе. Он наблюдается в двух частях в виде перехода пористой лавы в трапп и в виде перехода траппа в гранит<sup>1</sup>.

В связи с вопросом о происхождении гранитного расплава стоит вспомнить некоторые ранние взгляды Ляйеля, так как они содержат в зародыше некоторые из наиболее современных воззрений. Изолированные тела гранитов во вмещающих породах, возможно, обязаны своим происхождением присутствию «в середине пластов участков, состоящих из совокупности веществ, которые являются или более легкоплавкими, нежели остальная масса породы, или более подготовленными для сведения друг с другом и образования какой-либо формы гранита»<sup>2</sup>. Далее, «если неизменные осадочные пласты содержат кое-где слои или гнезда гранитных ингредиентов, притом так, что остальная масса состоит из различных других материалов, и если температура всей массы благодаря плутоническому воздействию поднялась достаточно высоко, то в результате в этих гнездах могут образоваться узлы и волокна гранита»<sup>3</sup>. Образование более крупных масс гранитного расплава также является следствием плутонической деятельности. Плутоническое влияние иногда проявляется «в таких гигантских масштабах, что мы должны считать, что не всегда осадочные пласты получают кристаллическую или измененную структуру в качестве следствия от близости гранитов, а скорее сам гранит, так же как и измененные осадочные породы, получил свою кристаллическую структуру от плутонических агентов»<sup>4</sup>. Эта «метаморфическая теория» лучше сформулирована в 12-м издании «Основ» (1875) на стр. 139:

«Превращение происходит благодаря воздействию подземного жара, при высоком давлении, к которому присоединяется проникновение в пористые породы горячей воды или пара и других газов. Все это ведет к различного рода реакциям химического разложения и возникновению новых соединений. В целом этот процесс может быть

<sup>1</sup> Elements, 217, 1838.

<sup>2</sup> Elements, 213, 1838.

<sup>3</sup> Principles, 4-е изд., 4, 385, 1835.

<sup>4</sup> Elements, 191, 1838.

отнесен к «плутоническим», так как этот термин одним словом выражает все разнообразие причин, которые действуют на больших глубинах в таких условиях, которые никогда не могут иметь места на поверхности. К этой плутонической деятельности можно отнести расплавление самого гранита — в недрах земли, а также появление метаморфических структур в осадочных породах».

Интересно выяснить, насколько первоначальная позиция Ляйеля в отношении гранитов, изложенная в «Элементах» в 1838 г., затем была изменена. Это можно определить по пропускам в издании «Элементов для студентов» 1871 г. Главнейшими из этих пропусков являются многочисленные положения, касающиеся переходов от гранита к вулканическим породам, от гранита к траппу и от плутонических к вулканическим породам, примеры, иллюстрирующие эти переходы, и утверждение, что плутоническая деятельность ведет к возникновению как гранитных, так и метаморфических пород. Ляйель жалеет, что он «не может... решиться дать в нескольких словах вразумительного изложения длинной цепи фактов и их объяснений, из которых геологи могли бы вывести заключение о природе плутонических пород», однако все же «можно предположить... что все граниты имеют огненное или водно-огненное (aqueoigneous) происхождение и образовались при больших давлениях на значительной глубине»<sup>1</sup>. Я обращаю внимание на слова «можно предположить» в последней формулировке Ляйеля. Далее я привожу последнюю цитату из этого автора. «Эти факты (т. е. те, которые касаются гидротермальной деятельности) могут склонить нас к мысли, не представляют ли собой иногда многие граниты и другие породы этого класса просто крайние члены подобного медленного метаморфизма»<sup>2</sup>.

Поскольку я посмел интерпретировать мысли этих двух ученых, Хеттона и Ляйеля, мне кажется они не дают никаких оснований для утверждения появившихся позднее взглядов, которые имели особое распространение среди тех, кто, говоря словами Хеттона, «судит о великих процессах царства минералов, зажигая лампу и смотря на дно маленького тигелька», взглядов, что

<sup>1</sup> Student's Elements of geology, 7, 1871.

<sup>2</sup> Student's Elements, 570, 1871.

если кто-нибудь сомневается в том, что граниты обязательно генетически связаны с базальтами, то такой человек является физически неполноценным, недобросовестным или слепым фанатиком. Эти ученые поместили гранит и базальт в одну и ту же категорию вещей, но они не производили их один из другого. Для них смысл термина «огненные» должен определяться из их собственных работ, а не из современного определения этого слова.

Образование гранита *in situ* в результате метаморфических процессов — идея, к которой, как мы видели, Ляйель относился неодобрительно — позже отстаивалась кругом геологов, возглавляемым Клифтоном Уордом (Clifton Ward) и А. Х. Грином (A. H. Green), которых я могу назвать школой Озерной области (Lake District). При изучении гранитов<sup>1</sup> Озерной области Уорд предложил на обсуждение идеи, которые, будучи украшены несколько более новой терминологией и затем чуточку приправлены физико-химическим лексиконом, могли бы иметь успех у наиболее революционных современных геологов. В отношении гранитов Эскдейл и Шэп (Eskdale and Shap) он говорит: «Граниты почти во всех случаях образовались в результате крайнего метаморфизма вулканических пород, подобно тому, который теперь можно видеть вокруг гранита. Я не рискую утверждать, что это происходит только в результате водно-огненного (aqueo-igneous) плавления этих пород. Весьма возможно, что нагретая масса, находящаяся ниже, сначала проедает себе дорогу вверх до достижения вулканических серий, породы которых метаморфизуются до такой степени, что принимают форму и структуру гранита<sup>2</sup>. С другой стороны, гранит Скиддоу (Skiddaw) мог образоваться не в результате крайнего метаморфизма пород, непосредственно его окружающих, а «на несколько больших глубинах» и прийти в более высокие горизонты земной коры путем «проедания себе пути вверх»<sup>3</sup>. Уорд задается вопросом, каким

<sup>1</sup> Quarterly Journal Geological Society (Q. J. G. S.), 1875, 1876.

<sup>2</sup> Q. J. G. S., 590, 1875.

<sup>3</sup> Q. J. G. S., 7, 1876.

образом гранит мог образоваться из таких несходных с ним пород, как лавы Борроудэл (Borrowdale) и сланцы Скиддоу. Он говорит: «Порода, имеющая состав сланцев, может превратиться в гранит в результате перегруппировки элементов, ранее находившихся в сланцах, к которой присоединяется привнос снизу некоторых из тех элементов, которые в первичных сланцах отсутствовали»<sup>1</sup>. Уорд неоднократно подчеркивает, что при метаморфизме магма становится мобильной (я далее еще буду разбирать этот термин), например: «нужно помнить, что гранитная масса, образованная в результате метаморфизма пород *in situ*, почти всегда становится в некоторой части интрузивной массой»<sup>2</sup>. Заключение Уорда, касающиеся принципиальных условий, при которых метаморфизуются породы, стоит привести полностью. Их три:

1) «Состояние, в котором наиболее важным или заметным элементом является *огненное плавление* (igneous fusion). Это можно видеть в лаве, излившейся из вулканического канала.

2) Состояние *водно-огненного* (aqueo-igneous) плавления, имеющее место на более значительной глубине и достигающее, как максимума только температуры слабо красного каления. Мы имеем все основания предполагать в этом состоянии гранитную магму, которая теперь застыла в различных местах под нашими ногами. Метаморфизм, вызванный влажным теплом и действующий под давлением при температуре, не достигающей 400° С, может проявиться в полном изменении минералогического и физического характера породы и в образовании... полевого шпата, авгита и т. д. Таким образом, пока гранит затвердевает в каком-либо месте, все окружающие породы могут сделаться гранитоидными и порфирировыми.

3) Состояние, в котором породы проникнуты водой при температуре, значительно более низкой, чем 400° С, ... при котором возникает... бесчисленное количество малых изменений»<sup>3</sup>...

Я могу прибавить, что в дискуссии, которая последовала за статьей Уорда, Дж. У. Джедд (J. W. Judd) выразил свое полное несогласие с выводами Уорда и поддерживал ту точку зрения, что «факты вполне совпадают с выводами, прямо противоположными тем, к которым пришел Уорд»<sup>4</sup>. Таким образом,

<sup>1</sup> Q. J. G. S., 30, 1876.

<sup>2</sup> Q. J. G. S., 30, 1876.

<sup>3</sup> Q. J. G. S., 32, 1876.

<sup>4</sup> Q. J. G. S., 33, 1876.

в то время разногласия были также ясно выражены, как и теперь.

Позиция А. Х. Грина полностью определяется «естественной классификацией кристаллических пород», данной им на стр. 445 его «Физической геологии», вышедшей в 1882 г.<sup>1</sup> Он устанавливает три класса пород: 1) вулканические породы, 2) plutонические породы, включающие значительную часть гранитов, и 3) метаморфические породы, также включающие некоторые граниты. Грин отмечает: «Есть граниты и граниты... некоторые образуются одним путем, некоторые — другим»<sup>2</sup>. Одни граниты возникли в результате метаморфизма пород *in situ*. Среди многих примеров, которые Грин приводит для иллюстрации этого положения, часть взята из Южного Нагорья Шотландии (Southern Uplands of Scotland). Эти примеры описаны Арчибальдом и Джемсом Гики (Geikie Archibald and James). Три последовательные стадии этого метаморфизма ведут к образованию трех типов гранита: пластового, бесформенного и интрузивного. По словам Грина<sup>3</sup>:

«Мы находим, что граниты залегают в трех формах. В первой они еще сохраняют следы слоистости или переслаиваются с явно слоистыми породами; здесь может быть некоторое сомнение в том, что они являются интенсивно метаморфизованными породами. Во второй, граниты залегают в виде бесформенных масс, которые выплавлялись постепенно со всех сторон в пласты неизмененных осадочных пород, и не показывают признаков прорыва сквозь прилегающие слои, но выглядят так, как будто они заполнили пространство, когда-то занятое породами, подобными вмещающим. Последнее хорошо объясняется предположением, что те части пород, внутри которых заключены эти желваки, были изменены в гранит. Метаморфизм здесь был более интенсивным, чем в первом случае, так как слоистости уже не видно, но все же недостаточно энергичным, чтобы сделать гранит способным к вторжению. В третьей форме граниты дают доказательства того, что они с силой внедрились в те породы, среди которых они залегают и их эруптивное поведение можно приписать повышенной энергии метаморфических процессов, ведущих к их возникновению».

Мы опять, таким образом, не видим во взглядах Уорда, Грина и многих их современников никакой необходимости выводить одну изверженную породу из

<sup>1</sup> А. Н. Green, *Physical Geology*, 1882.

<sup>2</sup> *loc. cit.*, 443, 1882.

<sup>3</sup> *loc. cit.*, 450, 451.

другой или отрицать, что граниты, например, могут образоваться несколькими различными путями. Есть граниты и граниты. Отметим, что время появления этих взглядов непосредственно предшествовало быстрому развитию микроскопической петрографии в руках Розенбуша и Циркеля в Германии, Тилля (Teall) и Харкера в Англии, Вильямса и других в Америке. Уже после были построены огромные и запутанные системы классификации горных пород. Я, конечно, не хочу умалить значение работы пионеров петрографии, но я боюсь, что породы стали изучаться все больше и больше в ящиках кабинетных шкафов и все меньше и меньше в поле. Как только все так называемые изверженные породы заняли свои места в рубриках литологической классификации, перед нами неизбежно должна встать генетическая интерпретация *расположения* пород в этой классификации. Но классификации пород имеют дело с весьма различными их свойствами и, по моему мнению, на данной стадии рискованно соединять в одно целое литологические и генетические особенности пород. Обычная классификация изверженных пород, даваемая в учебниках, совершенна для расположения образцов пород в кабинете, и я чувствую, как это попытаюсь объяснить ниже, что генетическая классификация провела бы такие линии деления, которые на чистеньких таблицах учебников показались бы мрачными трещинами. Я, однако, не имею никаких возражений к употреблению этих таблиц со следующими оговорками; во-первых, мы должны считать эти таблицы выражением классификации образцов пород как таковых, со всеми критериями классификации, определенными в образце, и, во-вторых, мы не должны позволить этим литологическим классификациям сковывать наши генетические представления.

Вот те соображения, которые я представляю на ваше рассмотрение на досуге, теперь я хочу вернуться к моей главной теме.

### МАГМА И МИГМА

В приведенном выше эклектическом определении гранитов я допустил вольное применение терминов

изверженная (igneous) и эруптивная порода и отметил предпочтительное употребление первого термина англо-американскими геологами и второго — геологами континента.

Заметное исключение из этого правила составляет заглавие книги С. Дж. Шэнда «Эруптивные породы»<sup>1</sup>. Шэнд подробно объяснил причины, почему он дал такое заглавие, и при этом упомянул о выводах Клифтона Уорда о двух состояниях магмы, которые я уже поместил выше. Вывод Шэнда заключается в следующем:

«Отсюда следует, что мы не должны были бы опраздывать причисление гранитов к огненным породам, образованным «действием огня» или безводным плавлением, что является первоначальным значением этого слова. Если термин «огненная» (igneous) передает тот смысл, что порода, к которой он прилагается, находилась в какой-то момент в состоянии безводного плавления при температуре 1000° и выше, то лучше его отбросить и предпочесть такие прилагательные, как эруптивная или магматическая, которые передают идею жидкости безотносительно к температуре».

Мы рассмотрели значение термина «огненные», который охватывает не только вулканические и действительно «огненно-жидкие» породы, но и любые породы, которые «имели возможность течь». Термины огненные (изверженные) и эруптивные часто употребляются так, как будто они являются синонимами, однако, как показал Шэнд, такое их употребление не является строго логичным. Что же тогда значит эруптивные? Одно из наилучших определений эруптивных пород дано Лаппараном, который сказал, что они вызывают представление об эруптивности (eruptivity) благодаря своему характеру залегания.

Полностью его определение гласит:

«Эруптивные породы суть геологические тела, которые по характеру своего залегания вызывают представление об эруптивности — изверженности. В большом количестве случаев они встречаются так, что их присутствие нельзя заранее предвидеть, они нарушают непрерывность прорываемых ими пород и их появление кажется внезапным»<sup>2</sup>.

Эруптивность, таким образом, является свойством тех пород, которые должны быть включены в извержен-

<sup>1</sup> S. J. Shand, *Eruptive Rocks.*, 1927.

<sup>2</sup> J. de Lapparent, *Leçons de Petrographie*, 79, 1923.

ную группу. Мы теперь можем перейти к рассмотрению некоторых новых определений этого слова «огненные» (изверженные, igneous). При этом мы сейчас же столкнемся с другим словом — *магма* и должны задаться вопросом, в каких значениях оно употребляется.

Мы можем начать с определения К. И. Тиллея в 14-м изд. Британской энциклопедии<sup>1</sup>.

«Все изверженные (igneous) породы затвердели из жидкого состояния; жидкость, которая застывает в виде горных пород, может быть отнесена к магме. Породообразующая магма (rock-magma) представляет собой сложный силикатный раствор, содержащий газы, важнейшими из которых является вода...»

Определения авторитетных учебников совпадают с этим, например:

«*Магма* — это объемлющий термин для расплавленных жидкостей, рождающихся внутри земли, из которых в результате их кристаллизации или других процессов консолидации образуются изверженные породы»<sup>2</sup>.

Или:

«Изверженными называются такие породы, которые затвердели из расплавленного состояния...»<sup>3</sup>.

«Первоначальный расплавленный материал горных пород удобно обозначить термином *магма*. Буквально, магма обозначает густую, вязкую, кашеподобную массу и потому это название вполне подходит к вязкому, расплавленному материалу, содержащему кристаллы, в процессе формирования»<sup>4</sup>.

Американцы также согласны с этим определением. Согласно А. Джохансену<sup>5</sup>, изверженные породы «обязаны своим происхождением вулканической деятельности, т. е. они застыли из расплавленного материала или на поверхности земли или под ее корой». Ф. Ф. Гроут<sup>6</sup> высказывается более определенно:

«Изверженные породы образуются из охлаждающейся магмы. Магма представляет собой природную жидкость, находящуюся внутри или на поверхности земли, в большинстве случаев очень горячую,

<sup>1</sup> C. E. Tilly, Encyclopedia Britannica, 14th ed., 17, 670, 1929

<sup>2</sup> A. Holmes, Nomenclature of petrology, 148, 1920.

<sup>3</sup> G. W. Tyrrell, The principles of petrology, 12, 1926.

<sup>4</sup> Там же, 47.

<sup>5</sup> A. Johansen, A descriptive petrography of the igneous rocks, 1, 4, 1931.

<sup>6</sup> F. F. Groul, Petrography and Petrology, 1932.

состоящую в основном из сложного силикатного раствора с небольшим количеством окислов, сульфидов и т. д. и почти всегда содержащую воду и газы, которые удерживаются в растворе благодаря высокому давлению» (стр. 6). «Хотя термин магма первоначально означал жидкость, он может включать в себя также те охлаждающиеся расплавы, в которых уже произошла частичная кристаллизация, поскольку их масса еще не окончательно затвердела» (стр. 143).

Розенбуш<sup>1</sup> говорит о магме так:

«Изверженные горные породы представляют собой геологически обособленные участки расплавленной внутренности земли... Наука о горных породах... занимается этими расплавами лишь постольку, поскольку из них образуются изверженные породы. Эти расплавы мы называем магмами или изверженными магмами».

Наконец, мы имеем наиболее тщательно продуманное определение П. Ниггли, который, написав труд под наименованием «Магма и ее продукты»<sup>2</sup>, может считаться наиболее крупным авторитетом в этой области. Я цитирую определение магмы из его недавней дискуссионной статьи по проблеме гранитов<sup>3</sup>:

«Породообразующая магма представляет собой молекулярный раствор, нагретый до температуры красного каления, находящийся или возникающий в глубинах земли и образующий обширные геологические тела, соединенные между собой. Магматические растворы, газы и пары, которые являются причиной образования месторождений аксессуарных минералов, имеют с такими породообразующими магмами тесную связь. При вулканических извержениях магмы вытекают в виде лав. Отсюда мы можем сделать вывод, что магматический расплав имеет сложный состав и что в нем растворены как нелетучие, так и летучие компоненты».

В довольно горячей критике различных «еретических» идей, которая оживляет страницы цитированной выше правоверной статьи, Ниггли невольно дал дальнейшее уточнение определению магмы, которое помогает нам уяснить существо дела. «Понятие магмы предопределяется существованием лавы и магма представляет собой расплав (Schmelzflüss, стр. 39); петрографы должны заняться вопросом, что представляет собой магма, расплав или твердое тело; решение вопроса приводит к понятию магмы (стр. 40); магма находится

<sup>1</sup> Rosenbusch, Elemente der Gesteinslehre, 27, 1923.

<sup>2</sup> P. Niggli, Das Magma und seine Produkte, Leipzig, 1937.

<sup>3</sup> Статья Ниггли в настоящем сборнике.

полностью в жидком состоянии или в состоянии перехода из жидкой фазы в твердую (стр. 45); согласно определению, магма должна быть вполне жидким расплавом (Schmelzlosung) или выжатым и собранным расплавленным материалом (Schmelzmaterial, стр. 77).

Из приведенных выше определений авторов различных стран можно принять, что изверженные породы образуются в результате затвердевания магмы, в основном, согласно Ниггли, представляющей собой расплав полностью жидкий, но, согласно другим авторам, заключающий в себе материал в состоянии месива или каши, что происходит благодаря присутствию кристаллов, уже успевших выделиться из расплава. Если породы сформированы другим путем, они не могут считаться изверженными. Употребление термина магма в последнем смысле находится в большем соответствии с первоначальным значением этого слова. Например, Скроп (Scrope)<sup>1</sup> проводит аналогию между лавой во время извержения и сахаром на одной из стадий его производства: «в обоих случаях вещество является не гомогенной молекулярной жидкостью, подобной расплавленной или полностью растворенной субстанции, а (согласно моим воззрениям на природу лавы) *магмой*, состоящей из кристаллических или зернистых частиц. Эти частицы обладают некоторой подвижностью, зависящей от присутствия интерстиционной жидкости, которая в обоих случаях является нагретой водой или паром» (стр. 121). Скроп подкрепляет это мнение сравнением лавовых структур с структурой многих сортов сахара, как, например, ячменного сахара, коньячных шариков, сахарных палок и т. п., но так как большинство из нас имеет только смутное представление о том, на что похожи эти чудесные сласти, мы едва ли можем оценить справедливость этого сравнения. В другом месте Скроп замечает: «мягкая масса, или магма, состоящая из зерен или несовершенных кристаллов, окруженных жидкостью» (стр. 45). Тот же смысл заключен в его формулировке взглядов Шерера (Scheerer) на характер плутонического материала во время его внедрения: «Весь гранит в опреде-

<sup>1</sup> Scrope, Volcanoes, 2d ed., 1872.

ленное время существовал в виде водяной пасты» (*une boullie aqueuse*) или влажной магмы...» (стр. 283). Далее, при рассмотрении различных структур лав Липари Скоп говорит: «Единственное возможное объяснение различных структур, представленных в двух типах пород, заключается в том, что последние (кристаллические, каменные разновидности) не были целиком расплавлены во время извержения, а состояли из зернистой магмы, т. е. не полностью сформированных кристаллов со смазкой из более жидкой массы и нагретого пара, образующих докрасна накалившую зернистую пасту» (стр. 335).

Физическое состояние месива, пасты, каши или пюре, которое имел в виду Скоп, может, теоретически, возникнуть различными путями. В одном случае, как мы видели, это будет смесь, состоящая из магмы и минералов, которые уже выкристаллизовались из этой магмы<sup>1</sup>. Полное затвердевание этой смеси должно дать изверженную породу, и если эта масса имеет специфический минеральный состав и структуру, она будет называться гранитом.

Другие типы смеси могут возникнуть не только в результате образования кристаллов в первоначально жидкой магме Ниггли, но и иным путем. Например, такая паста может получиться в результате присутствия остатков твердых частиц, заключенных в расплавляющемся базисе или в результате раздробления и рассеяния твердой породы в интрузирующей жидкости. Подобное месиво М. Рейнгард<sup>2</sup> назвал *мигмой*. При затвердевании месива этого рода в большинстве случаев получают не изверженные, а смешанные породы или *мигматиты*. Мигма, если ее жидкая часть становится достаточно значительной, должна приобрести подвижность, будет течь и сможет внедряться во вмещающие породы типичным эруптивным (или интрузивным) способом. Однако продукты ее затвердевания не будут

<sup>1</sup> P. Niggli, loc. cit., 41.

<sup>2</sup> M. Reinhard, Über Gesteinsmetamorphose in den Alpen. Auszug aus einem Vortrag, gehalten am 20 März 1935 in der Mijnbouwkundige Vereeniging zu Delft.

еще изверженными породами. Теперь предположим, что реликты твердых частиц пород полностью исчезают, так что мигма делается целиком жидкой. Как теперь мы должны называть жидкость и продукты ее кристаллизации? Рейнгард (стр. 44) и Ниггли (стр. 77), отвечая на этот вопрос, говорят, что мигма в этом случае сделалась магмой и, следовательно, продукты ее затвердевания являются породами изверженными. И если мигматическая губка сжата так, что жидкая часть ее отогнана и собирается где-нибудь в виде целого, эта отжатая жидкость также является магмой. Рассмотрим эти положения несколько более подробно.

Мы уже видели, что большинство определений магмы включает в себя то, что она является расплавом. Расплав означает, что вещество превратилось в жидкое состояние в результате нагрева. Повидимому, однако, в действительности безводные магмы могут, постепенно изменяясь, переходить в магмы, более богатые водой, магмы, обогащенные водой, в свою очередь могут переходить в богатые магмой растворы, а эти последние в концентрированные гидротермальные растворы и, наконец, в разбавленные растворы, подобные тем, которые выходят из горячих источников. В этой последовательной серии градации произвольны, но они обычно даются геологами, занимающимися рудными месторождениями. Т. К. Фемистер<sup>1</sup>, например, говорит, что «расплавленный характер магмы является возможно ее наиболее резким отличительным признаком» и «если доказано... что водный компонент присутствует в ней в заметной степени, то термин «магма» должен быть отброшен и заменен словами «гидротермальный раствор». Совершенно также К. С. Росс<sup>2</sup> полагает, что «магма представляет собой породообразующее вещество, находящееся благодаря высокой температуре в жидком состоянии, при остывании которого получают изверженные

<sup>1</sup> T. C. P h e m i s t e r, *Igneous Rocks of Sudbury and their Relation to the Ore Deposits, 34th Ann. Rep. Ontario Dept. of Mines, 34, 52, 1925.*

<sup>2</sup> C. S. R o s s, *Physico-chemical Factors controlling Magmatic Differentiation and Vein Formation, Econom. Geology, 23, 866, 1928.*

породы». Л. К. Грэйтон<sup>1</sup> выражает тот же взгляд, утверждая, что если «то, что кристаллизуется из флюида, не может больше называться изверженной породой, то весьма вероятно, что главная причина жидкого состояния изменилась и зависит теперь не от действия высокой температуры, а от действия растворения».

Во многих современных взглядах на способ образования мигматических смесей видное место занимает действие веществ, усиливающих подвижность, как, например, флюидов и растворов, в то время как значение действия тепла значительно преуменьшается. Следует ли, таким образом, применять термин «изверженная порода» к продуктам затвердевания мигм, которые стали полностью жидкими магмами, не будучи приведены в это состояние нагревом? Я думаю, что мы здесь можем воспользоваться «круговым» аргументом, который не является таким софистическим, как это кажется с первого взгляда. Если конечные продукты не отличаются от тех образований, которые мы привыкли считать изверженными породами, тогда жидкость, из которой они затвердели, может быть названа магмой, вне зависимости от того, как она образовалась. Получается как будто заколдованный круг: та или иная порода является изверженной потому, что она затвердела из магмы; магма определяется как жидкость, дающая при затвердевании изверженную породу. Однако мы должны отсюда исключить отложения из другого типа растворов, подобных соляным остаткам и жильным образованиям, как и вообще жильным месторождениям. Как заметил Н. Л. Боуэн<sup>2</sup>, «подобные жидкости (в двух последних случаях) никак не могут являться магмами в том смысле, в каком обычно употребляется этот термин, так как под магмой подразумевается жидкость, которая способна заполнить трещину твердой породой в результате единого инъекционного акта с последующим застыванием».

<sup>1</sup> L. C. Graton, Nature of the Ore-forming Fluid., *Econ. Geol.*, 35, 205, 1940, Русский перевод, 1946.

<sup>2</sup> N. L. Bowen. The Evolution of the Igneous Rocks, 131, 1928, Русский перевод, 1934

Как я уже указал, мое мнение таково, что мы должны включить в изверженные породы все продукты затвердевания полностью жидкого магматического расплава, вне зависимости от происхождения этой жидкости. Это находится в полном соответствии с воззрениями Хеттона и Ляйеля. Следует еще раз подчеркнуть, что затвердевание магмы, каким бы способом эта магма ни образовалась, ведет к образованию изверженных пород, а не мигматитов. Как указал Ниггли<sup>1</sup>, имеется тенденция рассматривать магмы, которые изменили свой состав в результате ассимиляции материала боковых пород, как мигмы, а продукты их кристаллизации — как мигматиты. Эта тенденция ведет к некоторой путанице. Я могу показать на моем собственном опыте в Шотландии, как я считаю правильным употреблять эти термины.

Массой, в которой залегают седиментогенные ксенолиты контаминированных пород северо-восточной Шотландии, являются изверженные породы, хотя в результате действия контаминации нормальная габбровая магма изменилась до того, что после затвердевания дала несколько необычную разновидность, содержащую кордиерит, гранат и шпинель. Ортонориты того же района, поскольку они кристаллизовались из магмы, являются также изверженными породами, хотя здесь и имела место реакция магмы с ксенолитами сланцев с изменением ее первоначального состава. Совершенно так же лампрофиры Сутерлэнда (Sutherland) тоже являются изверженными породами, хотя они и переполнены ксенолитами, с которыми магма реагировала почти наверняка.

Нужно отметить, что в следующих абзацах я воздерживаюсь от присвоения специального названия контаминированной породе, состоящей, скажем, из множества седиментогенных ксенолитов, заключенных в кордиеритовом норите, или из крупных участков богатого ксенолитами и сутерлэндского лампрофира. Я могу сказать, что только под очень сильным давлением я бы дал им какие-либо другие названия. Ясно, что эти куски являются смешанными породами, однако перед тем, как

<sup>1</sup> Niggli, loc. cit., 77.

дать им твердое наименование мигматитов, стоит посвятить некоторое время обсуждению этого термина.

Седергольм определяет понятие мигматит следующим образом: он «думает, что необходимо употребить это выражение для тех гибридных пород, которые характеризуются своим особым внешним видом и происхождением. Они выглядят как смешанные породы и образуются в результате смеси более древних пород с внедрившейся более поздней гранитной магмой; поэтому более всего к ним подходит название мигматит»<sup>1</sup>. Весьма важно установить, что для Седергольма понятие мигматит является как описательным, так и генетическим, поскольку он говорит о «внешнем виде и происхождении». Мигматиты должны «выглядеть как смешанные породы», так что гомогенные инъекционные гнейсы, подобные тем, какие мной описаны среди пород Центрального Сутерлэнда, хотя и образованы в результате смешения, могут и не подойти под эту категорию. Я надеюсь через некоторое время вернуться к вопросу — должны ли мигматиты выглядеть, как смешанные породы. Изложенная в упомянутом выше определении точка зрения, что магма, и именно гранитная магма, необходима для образования мигматитов, неуклонно проводилась Седергольмом во всех последующих работах, относящихся к этим породам. Например, он говорит: «большое количество магмы» происходит из глубин<sup>2</sup>, и предположения П. Холмквиста<sup>3</sup> и других представителей шведской школы, что лейкократовые жилы в инъекционных гнейсах или артеритах представляют, в основном эксудаты из окружающих пород, возникшие в результате ультраметаморфизма, являются, таким образом, неверными. Седергольм предпочитает относиться к плутоническим магмам как к заранее данному факту и не высказывает никакого суждения относительно их происхождения, ограничивая свое изучение взаимоотношениями этих магм с более древними породами, которые они инъецируют<sup>4</sup>. Затем далее он указы-

<sup>1</sup> J. J. Sederholm, *Bull. Com. Géol. Finlande*, 77, 136, 1926.

<sup>2</sup> *Loc. cit.*, 137.

<sup>3</sup> P. I. Holmquist, *Geol. Fören., Förh.*, 43, 612, 1921.

<sup>4</sup> J. Sederholm, *Bull. Com. Geol. Finlande*, 58, 4, 1923.

ваает, что во время мигматизации «магма тонко пропитывает массу более древних пород»<sup>1</sup> и «образование мигматитов зависит от химических свойств магмы», — основных мигматитов не бывает<sup>2</sup>. К. Х. Шейман в своих дискуссиях о номенклатуре мигматитов<sup>3</sup> считает, что происхождение магнеподобной или эквивалентной магме части мигматитов не является существенным для определения их названия, эта «магматическая» часть может возникнуть на месте и не быть связанной с гранитной магмой. Эта точка зрения совершенно отлична от мнения Седергольма, что, например, каждая аплитовая жила соединена с каким-нибудь определенным гранитом<sup>4</sup>. Мы можем принять в качестве авторитетного мнения по этому поводу недавнее заключение П. Ниггли<sup>5</sup>, которое в вольном переводе гласит:

«Мигматитами должны называться породы и участки пород, которые обнаруживают большое разнообразие магматических и метаморфических текстурных и структурных особенностей, образуются в переходных зонах между магматическим и твердым состоянием и претерпели метаморфизм, во время которого без какого-либо увеличения объема значительная часть их достигла флюидного или расплавленного состояния. Ассоциация мигматитов с гранитной магмой не необходима для того, чтобы они могли быть называемы мигматитами, так же как на это не влияет источник и история образования их жидкой фазы. Смешанные породы типа венитов Холмквиста могут таким образом подойти под это определение».

Если мы не будем далее развивать утверждение Ниггли, мы могли бы рассматривать богатые ксенолитами шотландские нориты и лампрофиры как мигматиты. Однако Ниггли продолжает:

«Нужно особо подчеркнуть, что могут образоваться породы, весьма сходные по внешнему виду с мигматитами, которые не могут быть названы мигматитами, так как они образовались не в пограничной зоне жидкость — твердое вещество внутри земли, рассматриваемой в целом».

<sup>1</sup> Loc. cit., 110.

<sup>2</sup> Loc. cit., 147.

<sup>3</sup> К. Н. Scheumann, *Tscher. Min. Petr. Mitt.*, 48, 297, 1936 *Mitt. a. d. Inst. f. Min. u. Petr. d. Univ. Leipzig*, 376.

<sup>4</sup> *Bull. Com. Geol. Finlande*, 58, 150, 1923.

<sup>5</sup> Статья Ниггли в настоящем сборнике.

Таким образом, у меня есть сомнения относительно точного наименования моих шотландских пород. Однако, поскольку мы уже знаем довольно много об их «внешнем виде и происхождении», мы можем оставить дискуссию об их положении и классификации до другого случая.

### ГРАНИТНАЯ МАГМА

Я полагаю, что мы должны принять, что изверженными породами являются такие породы, которые образовались в результате кристаллизации магмы, каким бы образом эта магма ни возникла; нет магмы — нет изверженных пород. Если эта магма, являясь закрытой или открытой системой, имела соответствующий состав, она должна была бы привести к кристаллизации гранита (согласно определению), и мы можем называть эту магму гранитной магмой. Я теперь рассмотрю некоторые предположения, возникающие относительно происхождения этой магмы. Я должен подчеркнуть, во-первых, что я здесь имею дело с гранитной магмой, *а не с гранитной породой*, и, во-вторых, что нас сейчас не должно интересовать существует ли гранитная магма в действительности или нет.

Для удобства я могу предпослать этому обзору изложение теорий о природе и положении земных оболочек. На то, что земля не является однородной от поверхности до центра, указывает разница между общей плотностью земли как планеты и средней плотностью пород на ее поверхности, а также ее форма и другие данные геофизики. Изучение сейсмических волн показывает, что внутри земли существуют отдельные зоны различного характера, т. е. что земля имеет концентрическую структуру. Учитывая скорость распространения сейсмических волн в различных зонах и наблюдающиеся физические свойства различных горных пород, геофизики высказали предположения о петрографическом характере земных оболочек. Р. А. Дэли<sup>1</sup> дал нам очень ценную критическую сводку этих гипотез, а также тех предположений, которые имеются по поводу мощности отдельных оболо-

<sup>1</sup> R. A. Daly, *Igneous rocks and the depths of the Earth.*, 173 — 183, 1933. Русский перевод, 1936.

чек. В мнениях геофизиков относительно обоих этих пунктов имеются значительные расхождения, и эти расхождения должны быть отмечены геологами, которые, по моему мнению, слишком склонны делаться немymi (во всех смыслах этого выразительного слова) в присутствии математиков-геофизиков. После обзора этих разногласий и рассмотрения неточностей наблюдений и выводов, Дэли допускает (выражение Дэли, стр. 177) ряд слоев в качестве основания для выделения земных оболочек и делает предположения об их характере.

Результаты Дэли даны в следующей схеме.

Слой А: преобладает гранит; основание слоя на глубине 30 км.

Слой Б: пьезо-гранит (т. е. эквивалент гранита при высоком давлении), переходящий ниже в пьезо-гранодиорит; 40 км ниже.

Слой В: преобладает пьезо-габбро.

Слой Г: стекловатый базальт, переходящий ниже, возможно с резкой границей в более железистый стекловатый базальт (и затем в стекловатый перидотит).

Таким образом, можно предположить, что оболочка гранитного состава находится над базальтовой оболочкой. Как мы увидим, это имеет для геологии огромное значение. Далее, из данных землетрясений установлено, что полная последовательность слоев имеется только под континентами, а под дном океанов верхний гранитный слой весьма тонок или вовсе отсутствует.

Эти представления были далее подкреплены рассуждениями, исходящими из того взгляда, что земная кора находится в равновесии или, употребляя техническое выражение, имеет изостатическую компенсацию. Океаны имеют большую глубину потому, что породы, подстилающие океаническое дно, обладают большей плотностью, континенты плавают выше потому, что материал, из которого они сложены, более легкий. Таким образом, мы никогда не можем видеть тяжелого слоя. На основании различных геофизических данных было высказано предположение, что внешние оболочки земли состоят из легкого гранитного материала, который почти весь сконцентрирован в изолированных континентальных массах, а нижний, более плотный и непрерывный слой имеет базальтовый состав. Существует прекрасный обычай

называть верхний слой, слагающий континенты, — сиаль, а базальтовый — сима.

Здесь нет необходимости обсуждать все теории возможного происхождения зональной структуры земли, и я приведу две точки зрения только для иллюстрации того, что даже в связи с этими глубокими материями среди более «поверхностных» геологов уже отчетливо наблюдается широкое расхождение во взглядах. Дэли считает, что эти два слоя образовались в результате фракционной кристаллизации во внешней зоне первобытной жидкости земли и что после повторявшегося отвердевания, расплавления, погружения и проваривания многих временных корок сиаль и верхняя часть симы, наконец, закристаллизовались с образованием той действительной коры, которая существует сейчас. Более ранний, тонкий и непрерывный внешний слой сиаля был смят и утолщен в изолированных континентальных массах в результате архейских горообразующих движений. С другой стороны, У. Х. Коллинс<sup>1</sup> выразил предположение, что сиаль образовался в результате взаимодействия симы и осадочной коры, которое также происходило благодаря горообразованию.

Как уже отмечено, представление о гранитном слое, слагающем континентальные массы и подстилаемом непрерывным базальтовым слоем, получает значительную поддержку от изучения природы и распределения пород земной коры, доступных для нашего наблюдения. В отношении внешнего слоя исследования наиболее древних и глубоких видимых частей коры показывают заметное преобладание гранитных типов, которое увеличивается с глубиной. Например, И. И. Седергольм<sup>2</sup> показал, что в Финляндии комплекс докембрийского основания состоит более чем на 50% из гранитных пород, а также более чем на 20% из мигматитов гранитного происхождения. Такое же преобладание гранитных пород можно видеть и в других обширных областях развития докембрийского фундамента во всех частях света. Дэли (стр. 185) сделал заключение, что главная масса сиаля, по крайней

<sup>1</sup> W. H. Collins, *Int. Geol. Congress XVI, USA, I, 271, 1936.*

<sup>2</sup> J. J. Sederholm, *Bull. Comm. Geol. Finlande, 70, 1925.*

мере до глубины 10 км, имеет промежуточный состав между гранитом и гранодиоритом и что ниже этого уровня состав сиаля, возможно, приближается к гранодиориту. Что касается более глубокой зоны, то, по данным наблюдений, во все геологические периоды интрузии основного состава приходили снизу и прорезали породы континентов. Далее, океанические острова сложены преимущественно базальтовыми породами, материал же гранитного состава в них отсутствует. Хотя с течением времени и ожидалось слабое изменение в составе извергаемой части базальтового слоя, общее сходство основных изверженных пород как континентальных, так и океанических площадей хорошо интерпретируется, как показатель того, что при их образовании затрагивался единый базальтовый слой, распространяющийся на весь земной шар.

Таким образом на основании целого ряда геофизических и геологических данных можно предположить, что, во-первых, гранитные сиалитические континенты покоятся на сплошной базальтической симе и, что, во-вторых, сиаль и по крайней мере верхняя часть симы являются твердыми и кристаллическими.

С ранних дней развития петрологии было хорошо известно, что доступные нашему наблюдению изверженные породы по своему составу принадлежат к двум главным типам, гранитному и базальтовому. Для иллюстрации этого факта мы можем представить следующие данные, взятые из сводных работ Дэли (стр. 32—41) и Т. Ф. Барта<sup>1</sup>.

#### Дэли

Граниты и гранодиориты занимают площадь, в 20 раз большую, чем все остальные интрузивные породы, вместе взятые. Базальты и пироксеновые андезиты слагают вместе по меньшей мере в 50 раз больший объем, чем все остальные экструзивы, вместе взятые.

#### Барт

	Габброидный состав, %	Гранитный состав, %
Экструзивные	Около 98	2
Интрузивные	5	Около 95

Из этих работ становится ясным другой факт, а именно, преобладание гранитов среди плутонических

<sup>1</sup> T. F. Barth, Correns, Eskola, Die Entstehung der Gesteine, 113, 1939.

или интрузивных изверженных пород и базальтов среди вулканических или эффузивных типов.

Эти замечательные факты, которые, как я уже сказал, были в общих чертах известны еще в начале развития петрографии, привели к представлению о том, что в земной коре существуют две магмы: кислая и основная, и из этих двух магм в результате их смешения или других причин могло получиться все разнообразие изверженных пород. Так, Бунзен в 1851 г. считал, что различие исландских лав может быть объяснено смешением кислой и основной магм, находящихся под этой областью. Общая проблема была рассмотрена Дюроше<sup>1</sup> в его петрологическом труде<sup>2</sup>. Согласно Дюроше «все изверженные породы, как более молодые, так и более древние, являются просто продуктами двух магм, которые совместно существуют в нижних частях твердой коры земли и занимают каждая определенное место». Магма, находящаяся выше, кислая по своему составу, является более легкой и вязкой. Она покоится на более глубоко залегающей и более жидкой основной магме и перекрыта твердой корой. В верхней магме имеет место концентрация летучих компонентов, и поэтому граниты, образовавшиеся из этой магмы, богаты фтор- и борсодержащими силикатами. Затвердевание внешней части кислого слоя дает «первозданный гранит» (*Granite primitif*), столь широко распространенный в древнейших частях доступной для нашего наблюдения земной коры. Основные интрузии имеют преимущественно более поздний возраст. Это происходит, по мнению Дюроше, следующим образом: гранитная магма поднимается по дислокационным трещинам в результате общего сжатия и благодаря расширению упругой жидкости. Это ведет к нарушению равновесия нижележащей основной магмы, часть которой и поднимается в трещины уже затвердевшего гранита. В более позднее время основная магма делается активнее, но все же кислые и смешанные магмы продолжают участвовать в процессе.

<sup>1</sup> Durocher, *Annales des Mines*, 11, 217, 1857.

<sup>2</sup> См. также Haughton, *Annual Address delivered before the geol. Soc. of Dublin*, Feb., 12, 1—2, 1862.

Таким образом, как для Дюроше, так и для Бунзена гранитная магма реально существует в земной коре. Однако Дюроше считает, что существование этой магмы неодинаково в различные геологические времена. По мере остывания земли внешняя кислая магма затвердевает все больше и больше и, следовательно, делается менее способной к внедрению. Поэтому-то граниты более обильны в древнейших частях земной коры. Этим были предreshены некоторые новые взгляды о специфичности и своеобразности архейской интрузивной деятельности.

Идея двух магм в более новые времена поддерживалась великим русским петрологом Ф. Ю. Левинсон-Лессингом, который основывал свои заключения о том, что в природе существуют «две независимые первородные магмы» — кислая и основная, на следующих фактах: среднее из двух таких магм дает средний состав изверженных пород земной коры; гранитные и габброидные породы имеют очень широкое распространение, в то время как другие породы развиты в сравнительно небольших количествах; гранитные и габброидные породы каждая в отдельности имеют свою область вариаций, но не соединены друг с другом переходными типами; когда породы одного типа внедряются в породы другого типа, образуются гибридные породы. Я обхожу дискуссию о том, каково зарождение этих магм, я могу только отметить, что А. Холмс и другие исследователи предполагают существование третьей магмы перидотитового состава.

Дюроше и другие считают, что кислая и основная магмы, слагая жидкие земные оболочки, могут подниматься во внешние участки коры и давать там интрузивные породы. Как мы уже вкратце указали, из геофизических соображений следует, что существование жидких оболочек маловероятно, и мы должны поставить вопрос о месте зарождения магмы и, в частности, гранитной магмы. С другой стороны, если мы допустим, что правильной является точка зрения двух магм, мы можем предположить, по крайней мере в порядке обсуждения, что кислая магма рождается в сиале, а основная — в симе; две магмы, две оболочки. Помимо предположения, что в твердой оболочке могут оставаться жидкие карманы, существует большое количество гипотез образования

местных магматических обособлений, гипотез, сперирующих с такими агентами, как высокая температура, давление, трение, реакции, газовое плавление (gas-fluxing), радиоактивность и т. п. Во многих случаях эти агенты приводятся в действие горообразующими процессами. Большинство из этих гипотез я могу здесь затронуть только в самых общих чертах.

Доктрина плавления отдельных частей земной коры, как мы уже видели, являлась существенной частью хеттоновой системы. Ляйель<sup>1</sup> считал, что имеются веские доказательства того, что «местное изменение температуры расплавляет одну за другой различные части земной коры». Проблема питания теплом для плавления и в особенности для чистого плавления сиала и симы в настоящее время является в петрогенетической дискуссии одной из самых главных. Рассмотрим сначала чистое плавление. Чистое плавление означает взаимное растворение минералов твердой породы без участия жидкости извне. Как установил Дэли<sup>2</sup>, многие выдающиеся петрологи в качестве причины образования магмы предпочитают гипотезу чистого плавления. Например, Н. Л. Боэун<sup>3</sup> говорит, что «многие гранитные магмы могут образоваться в результате непосредственного переплавления глубоко погребенных гранитов», которые, согласно ему, «в более отдаленные времена были образованы из основного материала». Эту гипотезу происхождения гранитной магмы мы рассмотрим далее. Харкер<sup>4</sup> замечает, что на глубоких горизонтах внутри земной коры «очевидно, должно иметь место... интенсивное плавление».

Я не собираюсь исследовать здесь вопрос об образовании базальтовой магмы путем переплавления симы и ограничиваюсь изложенным выше кратким перечислением главных воззрений по этому вопросу. Я сосредоточу свое внимание только на двух схемах образования гранитной магмы путем переплавления сиалического материала.

<sup>1</sup> Lyell, Principles, 12th Edit., 2, 201, 1875.

<sup>2</sup> Loc. cit., 289—290.

<sup>3</sup> N. L. Bowen, The Evolution of the Igneous rocks. 319, 1928. Русский перевод, 1934.

<sup>4</sup> Harker, Natural History of the Igneous rocks. 338, 1909.

Во-первых, к чистому плавлению отдельных частей может привести погружение сиала в глубинные зоны земной коры (*substratum*) в результате движений в течение возникновения и развития складчатых зон. Субстрат (стекловатый или какой-либо другой) может дать достаточно тепла для образования большого объема гранитной магмы, и потраченное тепло может быть пополнено из внутренних частей земли. В то время как основание огромной массы осадков в геосинклинальном прогибе не погружается достаточно низко для того, чтобы во время роста геосинклинали произошло плавление осадочного материала, образование этих прогибов локализует зоны складчатости и, следовательно, зоны дальнейшего погружения и увеличения мощности толщи. Тогда с течением времени сами осадочные породы могут оказаться под влиянием раскаленного субстрата. Ряд характерных черт огромных батолитовых масс гранитного состава указывает на генетическое родство их с горообразовательными процессами. Сюда относятся: залегание батолитов в складчатых зонах, удлинение по осям этих зон и тесная ассоциация времени их появления с эпохой горообразования (ср. Дэли, стр. 113). Согласно Э. М. Андерсону<sup>1</sup>, образование первичной гранитной магмы не противоречит современным геофизическим данным, но плавление гранитного слоя может иметь место только тогда, когда этот слой утолщен в результате горообразовательных движений.

Мы можем себе представить, что вместо погружения сиала вниз в субстрат и расплавления его там, субстрат сам поднимается в верхние слои и несет с собой достаточно тепла для того, чтобы расплавить значительные массы сиала с образованием гранитной магмы. Дж. У. Грэйг, Э. С. Шеперд и Х. Э. Мервин<sup>2</sup> экспериментально показали, что гранитная порода плавится при температуре на 200 или 300° С ниже точки плавления базальта. Если по какой-либо причине из горячего субстрата поднимается в сиаль крупное тело основной магмы,

<sup>1</sup> E. M. Anderson, *Bull. Volc.*, **3**, 78, 1938.

<sup>2</sup> J. W. Greig, E. S. Shepherd and H. E. Merwin, *Ann. Rep. Direct. geophys. Lab. Washington*, 77, 1931.

оно может расплавить здесь значительные порции сиалического материала. Эта концепция защищается главным образом А. Холмсом<sup>1</sup>. Холмс подчеркивает существенное различие между изверженными комплексами континентальных и океанических областей, заключающееся в отсутствии гранитного материала в последних и его обилие в первых. Гранитная магма образуется, по-видимому, там, где присутствует сиаль, который дает для нее материал. Загадочная ассоциация резко различных кислых и основных пород, наблюдающаяся во многих интрузивных комплексах, объясняется возникновением кислой магмы в результате поднятия основной магмы. Две магмы в представлениях Дюроше и Бунзена стали готовыми к действию. Холмс<sup>2</sup> делает заключение, что «налицо растущая вера в существование стекловатого субстрата, который и является источником магм или значительной части тепла, необходимого для генерации магм из кристаллического вещества вышележащих слоев».

В предыдущем изложении мы рассмотрели вопрос об образовании гранитной магмы путем чистого плавления сиала. Теперь мы коснемся идеи частичного плавления материала земной коры и выжимания появившейся таким образом жидкости из образовавшейся «губки» в виде магмы. При изучении некоторых пегматитов, залегающих в высокометаморфизованных гнейсах Швеции, П. И. Холмквист<sup>3</sup> в отношении «действительного плавления наиболее легкоплавких пород» высказал мнение, что кварц и полевошпат плавятся первыми, и вернулся, таким образом, к более ранним предположениям Ван-Хайза, Лэйна и Дэли. Этот принцип селективного переплавления в комбинации с действием того, что называется метаморфической диффузией и дифференциацией, рассматривается многими специалистами по древнейшим породам в качестве главного фактора образования последних. Для

<sup>1</sup> См. также *The Problem of the Association of Acid and Basic Rocks in Central Complexes*, *Geol. Mag.*, 241, 1931. *The Origin of Igneous Rocks*, *Geol. Mag.*, 543, 1932.

<sup>2</sup> *Loc. cit.*, 544, 1934.

<sup>3</sup> P. I. Holmquist, *On Pegmatit—palingenes och Ptygmatisk Veckning*, *Geol., Fö·en, Förh.*, 209, 1920.

нашей настоящей цели, однако, мы можем разобрать взгляды на степень участия этого селективного переплавления в образовании гранитной магмы, выдвигаемые, главным образом, Эскола<sup>1</sup>.

Эскола говорит, что его «все больше и больше захватывает идея об образовании гранитных магм главным образом в связи с орогеническими движениями, в результате выдавливания или выжимания наиболее легкоплавкого материала из еще не полностью затвердевших более основных пород и из пород, частично переплавленных в глубоких частях геосинклиналей»<sup>2</sup>. Поскольку Эскола считает доказанным, что первичным путем образования гранитов явилась кристаллизационная дифференциация<sup>3</sup>, он не находит фактов, подтверждающих осаждение кристаллов в огромных пространствах архейских гранитов, и потому он предпочитает гипотезу выжимания остаточной магмы из кристаллической сетки. Эта гранитная магма поднимается благодаря ее меньшей плотности или в результате движений земной коры и занимает преимущественно осевые части складок. Эскола утверждает, что частичное плавление более правдоподобно, чем чистое переплавление, так как даже в глубоко залегающих породах присутствует достаточное количество воды, которая значительно понижает температуру плавления наиболее легкоплавких веществ. Это должно дать нечто, более или менее похожее на гранитную магму, и такие магмы могут получаться из любых силикатных пород, содержащих гранитные компоненты<sup>4</sup>.

Как отмечено в предыдущем изложении, часть гранитной магмы, по мнению Эскола, получается путем выжимания остаточной магмы из «еще не полностью затвердевших основных пород», т. е., надо думать, из симы. Против этой части утверждения Эскола можно выдвинуть несколько возражений. Одно из них касается вопроса, будет ли остаточная жидкость иметь гранитный состав. Этот вопрос затрагивается на следующих страницах этой

<sup>1</sup> Eskola, On the origin of granitic Magmas, *Tscher. Min. Petr. Mitt.*, 12, 455, 1932.

<sup>2</sup> Loc. cit., 456, 1932.

<sup>3</sup> Loc. cit., 459, 1932.

<sup>4</sup> Loc. cit., 473, 1932.

статьи. Второе возражение касается механизма выжимания и третье — количества выжимающейся магмы. В связи с последним Эскола утверждает, что «количество симы, находящейся под сиаалем, очень велико и массы симы, которые приходят в движение во время орогенического цикла в каждой геосинклинали, должны быть достаточно велики для образования гранитов в больших масштабах»<sup>1</sup>. К вопросу о количестве кислых дифференциатов, получающихся из основных магм, я также вернусь несколько далее.

Эскола<sup>2</sup> считает, что в результате процесса селективного переплавления на более глубоких горизонтах может очень легко получаться высокогранитная (*highly granitic*) магма, которая может быть выжата в верхние части земной коры и там явится причиной значительного метасоматизма и других преобразований пород. Эти флюиды, образовавшиеся в результате переплавления, Эскола сравнивает с тем, что Седергольм называет «ихором» (*ichor*). Посмотрим, каковы происхождение и функция этого «ихора». Нужно вспомнить, что Седергольм считал, что гранитная магма необходима и достаточна для мигматизации. Из такой магмы шли гранитные соки, «ихор», насыщенные «эманациями» или «горячими плутоническими газами» Зюсса, которые были в состоянии проникать в окружающие породы. Благодаря процессу «переплавления», хотя в некоторых случаях, может быть, правильнее было бы сказать «перерастворения»<sup>3</sup>, эти породы превращаются в магму, которую Седергольм назвал палингенетической или возрожденной магмой. Процесс образования такой новой магмы из твердых горных пород был назван анатексисом. Ихор является или гранитным соком (*juice*, ср. Эскола, выше), варьирующим по консистенции от водного раствора до очень разжиженной магмы, или он может быть магмой, содержащей много воды в газовой фазе. Ихор в состоянии дать древним породам новую палингенетическую способность к извержению, без изменения их состава. Однако в большинстве

<sup>1</sup> *Loc. cit.*, 469, 1932.

<sup>2</sup> *Loc. cit.*, 21, 1933.

<sup>3</sup> J. J. Sederholm, *Bull. Comm. Geol. Finland*, 77, 135, 1926.

случаев изменение все же происходит, и образующаяся палингенетическая магма все больше и больше приближается к составу гранитной магмы. Седергольм считает, что значительные тела гранитов образовались в результате консолидации такой палингенной магмы. Продукты этой консолидации являются, согласно определению, изверженными породами и, если они имеют соответствующий минеральный состав, они являются гранитами.

Сейчас появляется тенденция включать в седергольмовский «ихор» все эманации, минерализаторы, растворы, соки, флюиды и т. п., которые некоторыми исследователями рассматриваются в качестве агентов метасоматического превращения твердой породы любого состава в породу состава гранита. Нужно ясно себе представить, что, так же как было расширено понятие мигматита по Седергольму, так это происходит и с его понятием ихора. Этот процесс образования пород гранитного состава есть гранитизация; в течение его возможно, хотя и не обязательно, образование гранитной магмы.

На предыдущих страницах я упомянул о той точке зрения, что образование архейских гранитных магм, продукты которых слагают такие большие массы древнейшей части доступной нашему наблюдению земной коры, отличается от образования более молодых гранитных магм, внедрившихся в кембрийские и более молодые породы. Эта точка зрения защищалась главным образом Р. А. Дэли<sup>1</sup>, который считает, что допущение лишь одного пути образования гранитов приводит к большим затруднениям. Дэли предполагает, что архейские гранитные магмы образовались благодаря анатексису и палингенезу в первозданной сиалической коре, и утверждает, что образование этих магм, занимающих большой объем, не требует непосредственного участия базальтовой магмы, идущей из симы. Условия возникновения больших количеств магм в кембрии и в более поздние времена существенно отличаются от этого. Согласно Дэли, палингенез имеет тут меньшее значение и в их образовании главную роль играет подъем сенсивной магмы из базальтового субстрата.

<sup>1</sup> R. A. Daly, *Igneous rocks and the depths of the Earth*, 1933. Русский перевод, 1936.

Во время горообразования сиалические блоки погружаются в субстрат и в результате в основание горных структур внедряется базальтовая магма. Вследствие высокой температуры субстрата блоки погруженного сиала расплавляются с образованием вторичных магм различного состава. Эти легкие магмы, в особенности гранитная, проходят сквозь базальтовый слой вверх к основанию гор и оказываются выше первоначально внедрившейся базальтовой магмы. Таким образом, гранитная магма оказывается под наиболее тонкой частью вновь образовавшейся горной структуры и может путем обрушения и замещения кровли пробить себе дорогу в еще более высокие горизонты складчатой зоны. Так устанавливаются те взаимоотношения между горными поясами и гранитными батолитами, о которых я говорил выше. Дэли считает<sup>1</sup>, что, принимая этот механизм, он преодолел затруднения, касающиеся вопроса о притоке тепла в больших батолитах. Он делает вывод (стр. 446), что гранитные расплавы могут образоваться различным путем в результате следующих процессов, а именно: селективного растворения во время регионального метаморфизма; повторной кристаллизации и переплавления первоначального основного материала с образованием как гранитных пород первозданного сиала, так и некоторых постархейских гранитов; чистого плавления древних гранитов; ассимиляции базальтовой магмой сиалических пород и последующей дифференциации; и, наконец, фракционирования остаточной жидкости при кристаллизации базальтовой магмы. Упоминание об этом последнем способе образования гранитной магмы — путем кристаллизационной дифференциации базальтовой магмы — заставляет меня подробно разобрать этот пользующийся признанием процесс.

До сих пор я в этой статье допускал возможность существования или возникновения в земной коре по меньшей мере двух магм, кислой и основной. Я привел некоторые суждения о тех гипотезах, которые выдвигались в различное время относительно их положения, взаимоотношения и возникновения. Во всех этих гипотезах проводится взгляд, что раз установлено существование сиалического

<sup>1</sup> Loc. cit., 426.

и симатического слоев, гранитная магма может образоваться независимо от любой другой магмы. Другими словами, мы принимаем, что гранитная магма является первоначальной магмой в полном смысле этого слова. Этот старый взгляд, после того, как он был сформулирован Бунзеном, Дюроше и другими, претерпел более или менее полное забвение. Его заменила гипотеза, заключающаяся в том, что разнообразные изверженные породы могли получиться благодаря различным процессам только из одной магмы. В результате главным образом лабораторных работ Н. Л. Боуэна и других исследователей в Геофизической лаборатории в Вашингтоне, вера в действительность всех этих процессов заменилась верой только в одну кристаллизационную дифференциацию. Количество первоначальных магм также сократилось до одной, именно — базальтовой. Согласно гипотезе одной магмы, гранитная магма представляет собой остаток, образовавшийся в результате кристаллизации базальтовой магмы. Мы можем рассмотреть это несколько более детально.

Полное изложение происхождения разнообразных изверженных пород путем кристаллизационной дифференциации можно найти в работе Н. Л. Боуэна<sup>1</sup>. Эта общая теория была в дальнейшем разработана и усовершенствована П. Ниггли, У. К. Кеннеди, С. Р. Ноккольдсом и рядом других исследователей<sup>2</sup>. Наибольшей популярности эта теория (к моему сожалению) достигла во время работ по изучению интрузивных комплексов Западной Шотландии, производившихся Британской геологической службой, что оставило соответствующий след в отчетах службы, описывающих эти комплексы.

Наблюдения показывают, что огромные количества магмы базальтового состава существовали во все геологические времена. Огромный объем и однородность базальтических масс земной коры привели петрологов к единодушному заключению, что базальтовая магма является первородной, т. е. образовалась независимо от

---

<sup>1</sup> Bowen N. L., *The Evolution of the igneous rocks*, 1928. Русский перевод, 1934.

<sup>2</sup> Niggli P., *Schweiz. Min. petr. Mitt.*, 18, 610, 1938.

других магм. Выше я уже приводил некоторые данные о распространенности базальтовых пород. На основании многих умозаключений, построенных на геологической основе (которая, в конце концов, является для геологов наилучшей), мы можем быть уверены, что первородная базальтовая магма действительно существует в земной коре. Как она возникает — это нас сейчас непосредственно не касается; мы сейчас разбираем вопрос о том, что с ней происходит, начиная со времени ее появления в коре.

Представление о погружении ранее образованных кристаллов в охлаждающейся и затвердевающей магме было высказано еще более столетия назад Скропом и Дарвином. Если эти ранее образованные кристаллы смогут обособиться или переместиться тем или иным путем или оставшаяся жидкость сможет из них выжаться, тогда, очевидно, может образоваться остаточная магма, состав которой может быть резко отличен от состава первоначальной магмы. В случае нашей первичной базальтовой магмы эти ранее образованные кристаллы должны быть представлены оливином — тяжелым минералом, богатым железом и магнием, бедным кремнекислотой и лишенным щелочей. Их отделение от магмы должно оставить богатую кремнекислотой и щелочами остаточную жидкость, которая при продолжении процесса фракционной кристаллизации будет приближаться к гранитной магме. Боуэн<sup>1</sup> показал, что в искусственных расплавах тяжелые кристаллы действительно тонут, так что гравитационная сепарация ранее выделившихся тяжелых кристаллов, например оливина, может иметь место в нашей первичной базальтовой магме. Далее, как это уже давно указано Джоржем Барроу, остаточная магма может быть отжата из пасты уже выделившихся кристаллов и образовать самостоятельные жидкие массы, которые могут перемещаться на большое расстояние от места их возникновения. Это отжатие может быть обязано или оротическим причинам или просто большому весу скелета выделившихся кристаллов. При таком механизме можно предположить появление всего разнообразия изверженных пород.

<sup>1</sup> Bowen N. L., *Am. Jour. Sci.*, 39, 175, 1915.

Никто не станет отрицать, что кристаллизационная дифференциация может происходить в лаборатории. Но многие выдающиеся петрологи пошли даже так далеко, что стали со страстью утверждать, что она имеет широчайшее распространение и в природе. Так это или нет — это может быть решено только при помощи геологических доказательств. В связи с этим мы должны постоянно вспоминать слова Л. К. Грэйтона о нашей слабости, когда мы сталкиваемся с физико-химическими аргументами — «мы невольно хотим думать, что единичный химический или физический факт может целиком покрыть любое количество геологических факторов»<sup>1</sup>. Я не собираюсь оспаривать обоснованность общей теории кристаллизационной дифференциации и хочу сосредоточить свое внимание только на некоторых возражениях, касающихся возможности образования больших количеств гранитной магмы.

Первое возражение касается качества остаточной жидкости. К. Н. Феннер<sup>2</sup> из Геофизической лаборатории в Вашингтоне утверждает, что в наблюдающихся случаях только одно отделение кристаллов, происходящее в базальтовой магме, ведет к обогащению железом остаточной жидкости. Это явление прекрасно обнаруживается в поле при исследованиях скаэргардской (Skaergaard) интрузии в Гренландии, произведенных Р. Л. Уагером и В. А. Диром<sup>3</sup>. Эти авторы говорят: «из фактических данных, наблюдаемых в скаэргардской интрузии, явствует, что фракционная кристаллизация базальтовой магмы ведет к образованию железистого габбро (ферро-габбро), а не промежуточных пород известково-щелочной серии» (стр. 335). Они считают, что известково-щелочные породы могут быть результатом смешения или кислого и основного материала, или основной магмы с сиалической корой,

<sup>1</sup> L. C. Graton, Nature of the Ore-forming Fluid, *Econ Geol.*, 35, 207, 1940. Русский перевод, 1946.

<sup>2</sup> C. N. Fenner, The Crystallisation of Basalts, *Am. Journ. Sci.*, 18, 225, 1929. The residual liquids of crystallising magma, *Miner. Mag.*, 539, 1931.

<sup>3</sup> L. P. Wager and W. A. Deer, The Petrology of the Skaergaard intrusion, Kangerdlugssuaq East Greenland, *Medd. om Grønland*, 165, No. 4, 1939.

или же кислой магмы с основными породами. Во всяком случае «в известной нам части земной коры присутствует лишь очень небольшое количество материала, имеющего состав железистого габбро (ферро-габбро). Это дает еще одно указание на то, что главная масса послекембрийских гранитов образовалась не в результате фракционной кристаллизации базальтовой магмы». Утверждение Феннера опровергается Эскола, Ниггли и другими, главным образом на том основании, что наблюдаемое Феннером обогащение остаточной жидкости железом мало сравнимо с гораздо более сильными изменениями в количествах других компонентов, которые в целом идут в направлении образования жидкости гранитного состава. Затем Ниггли<sup>1</sup> несколько легковесно отвергает заключение Уагера и Дира, считая его примером плохой практики научного исследования, обобщением из единичного случая, ничем не оправдываемым расширением поля экстраполяции и т. п. Я не буду продолжать изложение этих дебатов, я хотел только обратить внимание на то, что существуют мнения, не согласные с мнениями, которые базируются на данных физической химии.

Следующее возражение касается количества продуктов различного состава, получающихся в результате фракционной кристаллизации базальтовой магмы. На одной из предыдущих страниц я дал сводку подсчитанных объемов различных типов изверженных пород земной коры. Из этой сводки видно, что преобладающими плутоническими породами являются граниты, а преобладающими вулканическими породами — базальты. Промежуточные породы встречаются сравнительно редко.

Совершенно очевидно, что из данного объема базальтовой магмы путем фракционной кристаллизации может получиться только очень небольшое количество гранитной магмы, в то время как продукты промежуточного состава должны получиться в изобилии. Расчеты количеств различных продуктов такой кристаллизации были сделаны Ф. Гроутом<sup>2</sup>, который нашел, что, «как максимум,

<sup>1</sup> Niggli, loc. cit., 72.

<sup>2</sup> F. F. Groul, The use of Calculations in Petrology, *Journ. Geol.*, 34, 549, 1926.

только одна десятая часть средней базальтовой магмы может стать гранитом». Другой подсчет Гроута дал следующие цифры: из 100 частей базальтовой магмы может получиться 50 частей оливинового габбро, 30 частей габбро, 10 — диорита, 5 — кварцевого монцонита и только 5 частей остаточной гранитной магмы. Таким образом, промежуточные породы должны быть очень распространены, а гранитные породы встречаются редко. Этого в видимой части земной коры не наблюдается. Это возражение против теории кристаллизационной дифференциации подчеркивается А. Холмсом<sup>1</sup>, Р. А. Дэли<sup>2</sup>, Т. Крокстремом, С. Н. Феннером и другими. Дэли указывает, что по расчетам самого Боуэна выходит, что остаточная жидкость является все еще базальтической, даже после того, как кристаллизовалась половина первоначальной основной магмы. Этот результат, как говорит Дэли, «дает живое представление о том громадном количестве базальта, который должен кристаллизоваться для образования гранитного батолита. Является ли такой объем вероятным в случае любого постархейского батолита?». Совершенно так же огромные тела родоначальной базальтовой магмы, из которых предположительно образуются граниты, должны проложить себе дорогу в кристаллизовавшейся коре и их фракционная кристаллизация должна дать крупнейшие скопления тяжелых минералов — скопления, существование которых ниже гранитных батолитов нигде геофизическими наблюдениями не доказывается. В то время как количество видимых кислых вулканических пород вроде риолита таково, что оно может получиться путем кристаллизационной дифференциации из видимых базальтов, наличие гигантского объема гранитных пород является, по моему мнению, непреодолимым возражением против этой теории. В конце концов мы должны объяснить то, что мы видим в земной коре, а не то, что мы видим «на дне маленького тигелька».

Приверженцы теории кристаллизационной дифференциации делали различные попытки ответить на это возра-

<sup>1</sup> A. Holmes, The idea of Contrasted Differentiation, *Geol. Mag.*, 230—231, 1936.

<sup>2</sup> R. A. Daly, loc. cit., 401, 425.

жение. Так, Н. Л. Боуэн<sup>1</sup> полагает, что продукты кристаллизации промежуточных стадий, т. е. диориты, представлены не обособленными массами горных пород, а некоторыми слоями зональных кристаллов (by certain layers of the zoned crystals). (Это предположение, мне кажется, имеет малое отношение к гранитной магме.) С. Р. Ноккольдс<sup>2</sup> считает, что «кислый остаток при благоприятных условиях мог составлять по меньшей мере 15%». Это количество кажется мне до смешного малым. Эскола, как мы уже видели, считает, что, так как базальтовая магма содержит только очень малые количества гранитных элементов, то мы должны принять, что «количество симы под сиалем много больше» и для образования гранитов в больших масштабах во время каждого орогенического цикла должно притти в движение достаточное ее количество. Этот аргумент стоит того, чтобы сказать о нем несколько слов.

Недавняя полемическая статья Ниггли<sup>3</sup> более интересна в этом отношении. Он думает, что лучше считать основную и кислую магмы как начальную и конечную стадии одной серии развития, промежуточные стадии которой обнаруживаются только при особых обстоятельствах, одним из которых, например, является интрузия в подходящий момент; эти промежуточные продукты обычно эродированы. Во всяком случае, продолжает Ниггли, между светлыми и темными или, что то же самое, между кислыми и основными породами прокладывают такую резкую грань, что получается ложное впечатление о наличии пробела между этими двумя группами. Подчеркивание резкого различия между кислой и основной магмой является научным предрассудком (Aberglaube), стголоском идей, которые сейчас устарели в результате успехов полевой петрографии, микроскопии и физической химии. Так как постархейские граниты не связаны с архейскими гранитами, они не могут образоваться из послед-

<sup>1</sup> N. L. Bowen, Evolution of the igneous rocks, 90—91, 1928. Русский перевод, 1934.

<sup>2</sup> S. R. Nockolds, The idea of Contrasted Differentiation: a Reply, *Geol. Mag.*, 73, 533, 1936.

<sup>3</sup> Статья Ниггли в настоящем сборнике.

них путем их переплавления. Граниты настолько тесно связаны в одно семейство с основными породами, что идея различного происхождения кислой и основной магм является абсурдной. Кислая и основная магмы геологически едины. Нужно помнить, что можно наблюдать только видимые соотношения различных пород, в то время как кристаллизационная дифференциация действует внизу и гранитная магма, будучи более легкой и более насыщенной газами, приходит наверх. Преобладание гранитов среди плутонических, а базальтов среди вулканических пород, это как раз то, что и следовало ожидать, так как граниты имели достаточно много времени, чтобы обособиться от базальтов, в то время как базальты приходят к месту своего застывания быстро и остаются первичными и недифференцированными. Я чувствую, что спокойно могу предоставить беспристрастному читателю самому оценить обоснованность этих возражений Ниггли; когда они рассеяны в длинной статье, их еще можно принять по частям, но они становятся гораздо менее приятными, когда они собраны все вместе, как я это сейчас сделал.

Третье крупное возражение гипотезе кристаллизационной дифференциации касается физического механизма процессов. Простое оседание кристаллов под действием силы тяжести считается многими недостаточным для отделения остаточной жидкости от кристаллического каркаса. Этот вопрос разбирался главным образом А. Холмсом<sup>1</sup>. Когда со временем остаточная жидкость достигает точно гранитного состава, она составляет только 5, 10 или в крайнем случае 15% общего количества охлаждающейся массы; для отгонки этой остаточной магмы и для того, чтобы она могла дать самостоятельные гранитные тела, требуется очень сильное сжатие этой «губки». Никаких полевых наблюдений, которые бы указывали на действие такого стресса на массы основного состава, привести нельзя. Возможно, что если бы остаточной жидкости было бы больше, она могла бы высочиться из «губки», но тогда ее состав ни в коем случае не был бы гранитным.

<sup>1</sup> A. Holmes, The Idea of Contrasted Differentiation, *Geol. Mag.*, 228, 1936.

По этой и по многим другим причинам я предпочитаю остаться во мраке предрассудка, который кажется столь еретическим для Ниггли и других жрецов кристаллизационной дифференциации. Я уверен, что существуют фундаментальные генетические различия между гранитами и базальтами, которые идут гораздо дальше теорий одной, двух или многих магм. Обе группы являются, согласно определению, изверженными породами и обе находят себе соответствующее место в нашей прекрасной симметричной классификации изверженных пород. Но если мы выйдем за пределы классификации образцов горных пород, лежащих в ящиках лабораторий, мы, как я об этом говорил на предыдущих страницах, на нашей четкой таблице найдем целый ряд темных трещин. Исследование этого вопроса является последней темой первой части моего доклада.

#### ПЛУТОНИЧЕСКИЕ И ВУЛКАНИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ

Как мы уже видели, четкое различие между первичными и всеми остальными породами было сделано уже в начале развития нашей науки. Способ образования осадочных пород, извержение и застывание вулканических пород являются объектами всем доступных наблюдений. Совершенно иначе обстоит дело с первичными породами, сокровенные тайны которых до сих пор еще не раскрыты волшебной палочкой принципа актуализма. По мере развития наших знаний, все больше и больше первичных пород относят к вулканическим продуктам, образующим изверженные породы, объединенные одним генетическим признаком — затвердением их из магмы. Я, наконец, хочу рассмотреть следствие из этого единства, заключающегося, в основном, в том, что так как не может быть восьмисот магм, то ясно, что может существовать только одна. Некоторые из нас пытаются освободиться от этого ограничения. Стоит вспомнить, что Ляйель, по моему мнению, никогда в сущности не принимал категорию изверженных пород в целом. В первом издании «Основ»<sup>1</sup> породы делятся им на водные и вулканические, плутонические и

<sup>1</sup> Lyell, Principles, 3, 374, 1833.

метаморфические. Точно такая же четверная классификация появляется в «Учении Ляйеля»<sup>1</sup> — вулканические и плутонические породы находятся в разных рубриках. Мы можем вспомнить также «Естественную классификацию кристаллических пород» Грина<sup>2</sup>, в которой он делит эти породы на вулканические, плутонические и метаморфические.

Основное различие между вулканическими и плутоническими породами было дано недавно в работе У. К. Кеннеди и Э. М. Андерсона<sup>3</sup>, которые, собрав воедино большое количество исследований и исканий многих из нас, сделали, по моему мнению, крупный вклад в науку о петрогенезисе.

В первой части упомянутой работы Кеннеди различает две группы тел изверженных пород, которые он называет вулканической и плутонической ассоциациями. Чрезвычайно важно, что вулканическая ассоциация включает в себя также все интрузии, которые генетически связаны с вулканической деятельностью и происходят из того же магматического источника. Вулканическая ассоциация встречается в неорогенических областях, и члены ее имеют в подавляющем большинстве случаев основной характер; образующееся небольшое количество кислого материала можно легко объяснить кристаллизационной дифференциацией базальтовой магмы. С другой стороны, плутонические ассоциации имеют гранитный и гранодиоритовый состав, их внедрение находится в тесной ассоциации с орогеническими движениями и с ними связано широкое развитие процессов ассимиляции и контаминации. Выводы Кеннеди могут быть изложены его собственными словами<sup>4</sup>:

«а) Вулканические и плутонические ассоциации представляют собой два особых и, повидимому, независимых выражения магматической деятельности: они образуются из различных родоначальных магм и их последующее развитие контролируется различными процессами.

<sup>1</sup> Student's, Lyell, 1st Ed., 15, 1896.

<sup>2</sup> Green, Natural Classification of the Crystalline Rocks.

<sup>3</sup> W. Q. Kennedy and E. M. Anderson, Crystal layers and the origin of magmas, *Bull. Vol., ser., 11, 3, 24—32, 1938.*

<sup>4</sup> Loc. cit., 31—32.

б) Вулканические ассоциации происходят от универсальной базальтовой магмы (или магм), которая образуется в результате переплавления базальтовой оболочки — промежуточного слоя земной коры.

в) Плутонические ассоциации, несмотря на их более глубокое залегание, образовались на более высоких уровнях и ведут свое происхождение от первичной универсальной, гранодиоритовой родоначальной магмы. Последняя возникает благодаря переплавлению так называемого «гранитного» слоя. Подобное переплавление возможно только в орогенической зоне, где тектоническое утолщение коры приводит нижние части гранита в состояние плавления.

г) Может быть два случая вторжения магмы. Гранитные и гранодиоритовые батолиты проникают вверх, повидимому, довольно медленно, сопровождаясь волной гранитизации и мигматизации боковых пород до тех пор, пока они не задерживаются какими-то неизвестными нам формами гидростатического контроля до их выхода на поверхность. Восхождение базальтовой магмы имеет совершенно иной характер. Крупных интракрустальных резервуаров не образуется, и базальтовый расплав, повидимому, прямо проходит к поверхности по системе сравнительно узких дайкоподобных трещин. Затем он или изливается наружу, образуя лавовые потоки, или дает небольшие по размерам инъекционные тела, как, например, силлы и лакколиты, которые сами по себе могут представлять вулканические резервуары. Больше того, дифференциация основной магмы имеет место на тех же уровнях, что и ее кристаллизация и, следовательно, магматическая эволюция контролируется главным образом фракционной кристаллизацией».

Таким образом, здесь имеется ясное утверждение, освобождающее граниты от привязанности к базальтовой магме, утверждение, на основе которого, по моему мнению, мы можем произвести правильную перегруппировку всего того материала, который относится к отделу изверженных пород. Эта перегруппировка является той задачей, к которой мы должны перейти.

Первая часть моих размышлений окончена. Сам я теперь имею более ясное представление о том, что представляет собой гранит, и лучше знаком с гипотезами, касающимися образования гранитной магмы. Я думаю, что и я и вы теперь более подготовлены к тому, чтобы идти вместе дальше в таинственную и может быть даже мистическую область гранитизации. Если мои доклады будут опубликованы, я надеюсь, что они будут читаться вместе, ибо они дополняют друг друга.

Настоящая работа имеет эпиграфом цитату из Хетона. Я хочу заключить первую ее часть другой цитатой из этого же автора.

«Пока человек учится, человечество имеет различные мнения. Создавать мнения есть прерогатива человека. Эти мнения очень часто, я могу даже сказать обычно, ошибочны; но они исправляются, и таким образом в общем мы приближаемся к истине».

## ЧАСТЬ II

### СВЯЗУЮЩАЯ ГЛАВА

В первой части моих размышлений, представленных год назад, вместе с разбором очень многих других вопросов я попытался привести в порядок определения многочисленных значений очень часто употребляющегося в современной геологии прилагательного «изверженные» (igneous). Я надеюсь, что вы согласитесь со мной, что, во-первых, изверженными породами являются те, и только те, которые затвердели из расплавленной жидкости, во-вторых, что эта расплавленная жидкость, или магма, может образоваться различными способами и, наконец, в-третьих, исходный материал, из которого они происходят, никоим образом не влияет на законность их именованья — они все являются изверженными породами. Мы согласились, что авторитетные ученые всех стран считали гранит изверженной породой, и в соответствии с этим в своем обзоре я изложил все гипотезы о происхождении гранитной магмы. Мы видели, что гипотеза происхождения гранитной магмы путем фракционной кристаллизации первичной магмы базальтового состава вызвала грозные возражения. Мы предпочли, я смею на это надеяться, считать, что гранитная магма сама является первичной, и мы отметили, что ее источником могут быть сиалические слои земной коры. Наконец, после большой борьбы мы достигли крупного успеха в утверждении той мысли, что изверженные породы могут быть двух различных типов — принадлежать вулканической или плутонической ассоциации. Подкрепленные и освеженные, мы теперь можем отправиться в новую Одиссею.

Вот, что сейчас нам предстоит. Сначала мы должны будем более или менее подробно рассмотреть предположения, касающиеся гранитизации, т. е., широко говоря, процессов, при которых те или иные породы приобретают

гранитный характер. Действительность и масштабы процессов гранитизации являются теми вопросами, которые теперь разделяют петрологов гораздо резче, чем многое другое. Этот раскол длится уже почти целое столетие, и его причины и результаты заслуживают рассмотрения. Мы найдем, и я надеюсь достаточно основательные, доказательства того, что гранитизация действительно существует.

Поскольку мы допустили ее существование, мы должны принять, что породы, имеющие характер гранитов, образовались различными путями — есть граниты и граниты. Некоторые гранитные породы имеют изверженное происхождение, другие возникли в результате гранитизации. Мы должны, однако, рассмотреть возможность образования всех типов гранитных пород, будут ли они изверженными или нет, как следствие одной причины и как различные стадии единого процесса. Мы затем можем распространить это единство еще дальше и охватить также метаморфические породы. Таким образом, мы будем трактовать всю классическую группу «первичных пород», как образовавшихся в результате единого процесса. Во время этих обсуждений значение старого и почтенного термина «изверженные» (igneous) станет значительно уже. Но раз для понятия «изверженный» мы имеем верный критерий, раз мы представляем себе количество того, что принято на веру и что сконцентрировано вокруг зерна истины, мы будем подготовлены к изменению наших взглядов на горные породы — к перемене, которая является ни больше, ни меньше как возвратом к взглядам Ляйеля.

### ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИТИЗАЦИИ

Рассмотрению процесса гранитизации следует предпослать рассмотрение значений этого термина. Здесь нет необходимости прослеживать его историю, и я ограничусь только несколькими новыми определениями, выбранными из различных источников.

Первое определение я беру из одной наиболее значительной современной работы по гранитизации — статьи

Г. Андерсона о гранитизации в крае Инно<sup>1</sup>. Андерсон говорит:

«Гранитизация никогда не была определена точно. В узком смысле она должна была бы относиться к образованию гранитов, однако, поскольку теоретически породы, образующиеся в результате замещения и перекристаллизации, могут иметь состав монцититов, гранодиоритов, диоритов или габбро, этот термин следовало бы расширить и распространить его и на эти случаи. Этим мы избегаем применения таких громоздких терминов, как «гранодиоритизация» или «габброизация».

В этом смысле гранитизация является сложным процессом, заключающим в себе перекристаллизацию осадочного материала под действием высоких температур, давлений и реакций между этим материалом и эманациями, проникающими, пусть часто в сравнительно малых количествах, из нижележащей магмы. Реакции и перекристаллизация без сомнения действуют совместно.

Следует попытаться установить различие между ассимиляцией и гранитизацией. В первом случае магматические флюиды находятся в избытке и растворяют или поглощают осадочные породы... или путем их «выплавления» или реагируя с ними до периода кристаллизации. Во втором случае гранит образуется на месте в результате реакции между магматическими флюидами и твердым материалом осадочных пород. Растворение и перекристаллизация идут совместно. В каждый данный момент сколько-нибудь значительные массы жидкости отсутствуют; большинство магматических эманаций могут быть газообразными. Количество материала, привнесенного из магмы, может быть в действительности относительно небольшим, так что процесс тогда заключается только в одном замещении».

М. Мак-Грегор и Д. Вильсон<sup>2</sup> определяют гранитизацию следующим образом:

«Мы определяем гранитизацию в широком смысле этого слова как процесс, благодаря которому твердые породы превращаются в породы гранитного характера. Она включает в себя такие процессы, как палингенез, синтексис, переплавление (*transfusion*), пропитывание, метасоматизм, мигматизация, инъекция, ассимиляция и контаминация, которые применяются различными авторами, однако редко с ясно определенными значениями».

Другая общая формулировка, имеющая особую ценность, потому что она исходит от геолога, не слишком

<sup>1</sup> G. H. Anderson, Granitization, Albitization and Related Phenomena in the Northern Inyo Range of California-Nevada, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 48, 1937.

<sup>2</sup> M. Mac-Gregor and G. Wilson, On Granitisation and Associated Processes, *Geol. Mag.*, 76, 1939.

заинтересованного в гранитизации, может быть взята из работы Л. К. Грэйтона<sup>1</sup>.

Это составное положение гласит:

«Ореолы гранитизации, употребляя этот термин в том обычном, широком смысле, который не требует того, чтобы исходная магма или образующиеся из нее продукты обязательно обладали точным составом настоящего гранита, . . . представляют области превращения всех видов более ранних пород в материал, обладающий настолько близким к граниту составом и структурой, что, во многих случаях, они могут быть ошибочно приняты за нормальную интрузивную породу».

В своем обсуждении проблемы гранитов П. Ниггли<sup>2</sup> подчеркивает, что гранитизация и фельдшпатизация обычно скрывают за собой продукты многих различных процессов, главнейшими из которых являются:

1) Минералогические и структурные изменения в результате развития зернистой структуры с новообразованием полевого шпата; чистая перекристаллизация происходит без изменения валового состава породы.

2) Превращение пород в «гранитоподобные» породы путем перекристаллизации, сопровождающейся пневматолито-гидротермальным переносом материала, например щелочей.

3) Гранитизация в результате инъекционных процессов.

4) Гранитизация в результате ультраметаморфизма, например осадочных пород вместе с их расплавлением и переносом вещества. Палингенез является крайним случаем этого типа гранитизации».

Будет полезнее сформулировать определение гранитизации по возможности независимо от тех или иных генетических представлений. В наиболее широком и простом смысле, освобожденном от всех генетических ограничений, гранитизация означает, говоря словами Мак-Грегора и Вильсона, процесс, в результате которого твердые породы превращаются в породы гранитного характера. Это положение в свою очередь приводит к двум соображениям. Во-первых, оно означает, что существуют граниты, которые не являются продуктами гранитизации, так как для сравнения должен существовать стандартный гранит, имеющий другое происхождение. Стандартный гранит образуется, повидимому, в результате затвердевания гранитной магмы. Это «полновластный» гранит, с которым

<sup>1</sup> L. C. Graton, Nature of the Ore-forming Fluid, *Econ. Geol.*, 35, 1940. (Русск. перевод, Госгеолиздат, 1946.)

<sup>2</sup> Статья в настоящем сборнике.

мы имели дело в моем прошлогоднем докладе. Так же как и тогда, я очень прошу вас не относиться к существованию таких гранитов со слепой верой. Для целей нашей дискуссии лучше осторожно принять, что изверженные граниты определяются как таковые авторитетными учеными. С этими гранитами и сравниваются продукты гранитизации.

Рассмотрение второй стороны определения Мак-Грегора и Вильсона показывает, что здесь необходимы некоторые генетические ограничения. Если мы откажемся от предположения, что все магмы являются реликтами первичной жидкой оболочки земли, мы должны принять, что они возникают в результате перехода в жидкое состояние твердых горных пород. Поэтому граниты изверженного происхождения должны подойти под это определение. Мы можем вспомнить положение Хеттона, что «природа создала гранит по тому же принципу, как и другие затвердевшие слои, поскольку скопление различных материалов и последующее плавление плотных их масс являются неизменными процессами при образовании всех твердых масс земли». Мы можем напомнить различные предположения об образовании гранитной магмы благодаря плавлению сиаля. Во всех этих предположениях, как старых, так и новых, твердые породы превращаются в породы гранитного характера, проходя промежуточную магматическую стадию. Это генетическое ограничение следует присоединить к определению гранитизации, данному Мак-Грегором и Вильсоном.

Поэтому я делаю поправку и определяю гранитизацию следующим образом.

*Гранитизация означает процесс, в результате которого твердые породы превращаются в породы гранитного характера без прохождения через магматическую стадию.*

Определение Гроута <sup>1</sup>:

«Гранитизация включает в себя группу процессов, в результате которых твердая порода (без приобретения жидкостности, которая могла бы сделать ее в какой-либо момент времени мобильной) становится по минеральному составу, структуре или по тому и другому вместе, больше похожей на гранит, чем она была раньше»

<sup>1</sup> F. Grou t, Formation of igneous looking Rocks by Metasomatism, *Bull. Geol. Soc. America*, 52, 1540, 1941.

до некоторой степени сходно с нашим, но содержит некоторые особенности, которых я не могу принять. Я предлагаю теперь выяснить, существует ли гранитизация или нет, путем изучения гипотез и дискуссий, в той или иной степени относящихся к этому вопросу.

### ФРАНЦУЗСКАЯ ШКОЛА

Различия между школами геологической мысли в отдельных странах, часто глубокие и постоянные, могли бы быть предметом исключительно интересного и увлекательного исследования. Одна ветвь этого исследования должна была бы затронуть расхождения во взглядах французов и немцев на то, что происходит на гранитных контактах. Более столетия французские геологи последовательно отстаивали наличие на этих контактах той или иной формы гранитизации. Новейшие защитники этого процесса часто забывают о том, что они находятся в долгу у французской школы. Соответственно я приведу здесь ряд важнейших положений французской школы.

Еще в 1824 г. Ами Буэ<sup>1</sup> высказал предположение, что тепло и эманация, идущие из внутренней части земли, ведут к процессам, которые мы теперь должны были бы включить в понятие гранитизации. Буэ говорит (я цитирую по Ниггли, 1942):

«Огненный жар газовых эманаций, выделяющихся из внутренних частей земли при более или менее сильном сжатии, привел бы сланцы мало-помалу в состояние, близкое к горячему разжижению... Элементы сланцев потеряли бы силу сцепления, их составные части отделились бы друг от друга, и газовые эманации могли бы проникнуть в образовавшиеся таким образом пустоты. Так, могли бы начать действовать силы химического сродства, интенсивность которых ограничена действующими в обратную сторону силами сцепления. Составные части пород за время превращения в жидкое состояние и медленного охлаждения могли бы принять более или менее кристаллическое состояние, не нарушая и не уничтожая заметным образом первоначальную сланцеватую структуру. Кроме того, действие химического сродства, обусловленного привнесенными в эти породы посторонними веществами привело бы путем, так сказать, возгонки к появлению многообразия минералов, рассеянных среди кристаллических сланцев в виде гнезд, скоплений и прожилков».

<sup>1</sup> Ami Boué, *Annales des Sciences naturelles*, 41, 1824.

В тридцатых годах прошлого столетия фельдшпатизация и связанные с ней проблемы были затронуты ученым — тогда еще не достигшим своей полной силы — Ж. Фурне (Fournet) из Лиона<sup>1</sup>. Фурне считал, что среди метаморфических пород одни образовались в результате простой перекристаллизации, а другие, благодаря частичному плавлению, в соединении, в отдельных случаях этого процесса, с привнесом и выносом материала. Он представлял себе, что очень похожие друг на друга породы могут иметь различное происхождение. Гнейс, например, мог иметь изверженное происхождение и подняться в виде расплавленного материала из глубин земной коры, однако весьма похожие породы могли возникнуть и в результате изменения осадочных пород. Он задается основным вопросом: каким образом решить, является ли тот или другой гнейс переплавленной породой, или он представляет собой глинистую породу, которая была фельдшпатизирована и стала кристаллической с новообразованием слюды? На этот вопрос он сразу дает ответ, который мы, члены ассоциации геологов, должны особенно оценить. Он говорит: решить вопрос нам помогают геологические соотношения. Этот ответ так же, как и мои статьи, является примером многочисленных призывов, которые делались в последние несколько лет, когда я подчеркивал исключительную важность *геологических* наблюдений при изучении всех проблем гранитизации, мигматизации, контаминации и других близких процессов. В недавней дискуссии в Геологическом обществе, чьим гостеприимством мы имеем удовольствие пользоваться сегодня, я предложил на обсуждение, как мне кажется, банальную и очевидную доктрину, что главную роль в решении этих вопросов должны играть геологические доказательства. Вы можете принять эти доказательства на веру или вы можете совершить паломничество для того, чтобы видеть их собственными глазами. Чего, однако, вы не должны делать, это не давать себя убедить не геологическим аргументам и в тех случаях, когда они находятся в противоречии с геологическими фактами.

---

<sup>1</sup> J. Fournet, *Neues Jahrb.*, 1837, 1838.

Следующим крупным этапом в ходе мыслей французской школы по этому вопросу была идея о минерализаторах — *agésnts mineralisateurs*, сформулированная О. Сент-Клер-Девиллем (H. St. Claire Deville) в 1842 г. Так как эта идея Девилля развивалась и распространялась в течение столетия — что является хорошей мерой успешного ее применения, — следует дать ее оригинальную формулировку.

«Среди природных газообразных веществ встречаются такие, которые, не фиксируясь ни в одном из веществ, с которыми они входят в соприкосновение, превращают их в различные минералы, совершенно подобные тем, которые встречаются в природе... Вот эти-то вещества я и предлагаю называть *минерализующими агентами*.

Я характеризую их непрерывностью действия, которое продолжается неопределенно долго до тех пор, пока они не будут фиксированы в веществах, отличных от тех, на которые они призваны воздействовать, так сказать, одним своим присутствием. Эти вещества, когда они существуют в природе, что позволяет вводить их в геологические гипотезы, вместе с водой встречаются действительно повсюду, причем вода никогда их не уничтожает и не ведет к ослаблению их действия».

Для иллюстрации следующих стадий развития идей французской школы мне лучше всего проанализировать относящиеся к этому вопросу работы, появившиеся в 1847 г. в «Бюллетене французского геологического общества». Для нашей темы этот том содержит работы исключительной важности, так как в нем приняла участие плеяда таких ученых, как Вирле д'Ауст, Эли де-Бомон, Дюроше, Фурне и Шерер. Мы можем бегло взглянуть на некоторые стороны их положений. Я сейчас не буду рассматривать остроумную полемику, которая перешла в оживленный, свойственный французскому характеру, настоящий поединок пяти лиц.

Почти двадцать лет Вирле д'Ауст имел дело в Греции и Франции с интенсивно выраженными контактовыми явлениями и с образованием гранита и порфира в результате метаморфических процессов. В 1844 г. он представил работу<sup>1</sup>, в которой в общем виде описал

<sup>1</sup> Virlet d'Aoust, Note sur les roches d'imbibition, *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 1, 2nd Series, 845, 1844.

явления проникновения изверженного материала в осадочные боковые породы.

Его идеи и его терминология оказывают влияние на мысль французских геологов вплоть до наших дней. Я пользуюсь случаем указать, что я предпочитаю употреблять для подобных процессов комплекса Центрального Сутерленда (Central Sutherland) вместо «имбибиции» другой термин. В сборнике 1847 г. имеются две интересные для нас статьи Вирле. Длинная сноска в короткой статье о ледниках посвящена общему изложению его взглядов на происхождение метаморфических порфиров и «имбибиционных» пород. Его вторая статья (стр. 498—505) имеет привлекающее внимание заглавие: «Наблюдения над нормальным метаморфизмом и вероятность отсутствия действительных первородных пород на поверхности земли» («Observations sur le métamorphisme normal et la probabilité de la non-existence des véritables roches primitives à la surface du globe»). Мы можем рассмотреть ее более подробно.

Вирле начинает с одобрительных ссылок на некоторые стороны взглядов Фурне и Шерера. Оба они, так же как Дюроше и многие другие в то время, были крайне заинтересованы вопросом последовательности кристаллизации в граните. Как известно, наблюдения указывают на то, что, повидимому, тугоплавкие минералы кристаллизуются позже легкоплавких. Фурне объяснял это *сверхплавкостью* (sur-fusion) — своего рода переохлаждением, в то время как Шерер высказал предположение, что «перед затвердеванием гранитная часть — «густое и влажное тесто» — была пропитана водой и таким образом кристаллизовалась при более низких температурах, нежели сухой расплав» (стр. 492). Вирле отмечает, что вода, содержащаяся в осадочных породах, будет, очевидно, принимать участие при переходе их в гнейсы или граниты.

Вирле вводит термин *гранитификация* вместе со следующим положением:

«Превращение осадочных пород в граниты или, употребляя слово, которое характеризует явление, — их гранитификацию, не труднее допустить, чем их превращение в гнейс. Достаточно лишь предположить, что метаморфизирующее воздействие было более прямым

или более интенсивным или, что оно было более длительным» (стр. 499—500).

Гранитификация, заключает Вирле, не обязательно требует высокой температуры. На это указывает сохранение слоистых текстур, например в гранитах Бретани, что видно при рассмотрении парижских тротуаров, сложенных кусками этих гранитов, заключающих бесчисленное количество обломков боковых пород (стр. 501).

«Обращение» к парижским тротуарам делалось Вирле уже раньше и его повторил Делесс<sup>1</sup> в 1858 г. и Мишель-Леви в классической работе о Фламанвиле 1893—1894 гг. (стр. 9). Вирле (стр. 144) считает, что лучший способ изучения гранитов и того, что мы сейчас называем ксенолитовыми породами, заключается в обследовании тротуаров, в особенности, как сказал позже Мишель-Леви, в «очень дождливый день». Вирле дает этот совет потому, что «свежий излом нигде не виден столь ясно и столь отчетливо, как на тротуарных плитах, отполированных ступающими по ним ногами, особенно если эти плиты мокрые».

Дюроше в своей «Заметке об одном виде гранита из Нормандии и Бретани»<sup>2</sup>, помещенной в сборнике 1847 г. на стр. 140, критикует взгляды Вирле относительно того, что эти граниты образовались из осадочных пород и содержат гальки кварца; указанные гальки являются, по мнению Дюроше, кварцевыми конкрециями, образовавшимися при кристаллизации случайным образом. Вирле на это ответил, что в этих гранитах никаких сегрегаций нет, но зато в них имеется огромное количество обломков осадочного происхождения и что некоторые кремнистые обломки сохранили первоначальную форму морской гальки. Нам нет необходимости обсуждать последний спорный пункт Вирле, но мы можем отметить, что уже сто лет назад существовало резкое различие во мнениях, касающихся происхождения некоторых включений в гранитах. Одни их рассматривали как сегрегации, другие — как ксенолиты. Эта дискуссия, продолжающаяся до сих пор, выражает коренное различие

<sup>1</sup> Delessé, *Études sur le Métamorphisme des Rôches*, 316, 1858.

<sup>2</sup> «Note sur une espèce de granite provenant de la Normandie et de la Bretagne», 1847.

взглядов на происхождение гранитов, выдвигаемых противоположными школами. Если мы желаем сохранить гранитную магму насколько возможно чистой и не загрязненной, тогда темные пятна в граните должны мыслиться по словам Гроута как «результат некоего непонятного процесса сегрегации или секреции»<sup>1</sup>. Если, с другой стороны, мы предположим, что гранитная магма должна вследствие своей природы действовать на боковые породы или же, что гранитная магма может с большей правильностью рассматриваться как гранитная мигма, тогда именно эти «пятна» дают нам ключ к пониманию истории породы.

В сборнике 1847 г. имеется сделанный Фраполи перевод важной для нас работы Шерера «Дискуссия о плутонической природе гранита и примыкающих к нему кристаллических силикатов». Шерер задается вопросом: каковы же те факты, которые должны лечь в основу теории гранитов. На плутоническое происхождение гранита как будто бы указывают контактовые явления и сходство его состава с некоторыми бесспорно вулканическими породами (стр. 475). По мнению Шерера, это, однако, не является серьезным доказательством изверженного происхождения гранита, и проблема может быть разрешена только путем изучения тонких текстур самой породы. Такое исследование показывает, что в событиях, которые происходят в гранитной «пасте», превалирующую роль играет вода, так что эта «паста» должна быть «водянистой кашцей» (*bouille aqueuse*) (стр. 489). Шерер считает имбибицию весьма важным процессом при контактовом метаморфизме (стр. 494) и, обсуждая превращение глинистых пород в породы гранитного и гнейсового облика, заключает, что подобные преобразования, как это наблюдалось в Норвегии, обязаны прогреву пород, содержащих воду (стр. 494—495).

Крупнейшей фигурой среди французских геологов этого времени был Эли де-Бомон. Прекрасный очерк об этом человеке, сенаторе Франции и крупном ученом, недавно был дан П. Фалло<sup>1</sup>, а сводка его работ, вклю-

<sup>1</sup> F. Groul, *Petrography and Petrology*, 61, 1932.

чая краткое изложение его гипотезы эманаций, которую мы далее рассмотрим, появилась в 1878 г. в труде С. Сен-Клер-Девилья «Исторический взгляд на геологию и на работы Эли де-Бомона».

Автор почти двухсот пятидесяти геологических работ, Эли де-Бомон мастерски владел всеми ветвями этой науки. Мы займемся здесь только одной его работой — его «Заметкой о вулканических и металлоносных эманациях», которая занимает стр. 1247—1333 сборника Французского геологического общества за 1847 г. Как заметил Фалло, эта классическая работа легла в основу современного учения о минеральных месторождениях. Я могу здесь коснуться только тех частей этой работы, которые имеют непосредственное отношение к моей сегодняшней теме.

Первый пункт в работе Эли де-Бомона, на который я обращаю свое внимание, представляет для нашей дискуссии огромный интерес. На основании ряда фактов Эли де-Бомон сделал заключение, что существуют две, в корне противоположные группы эруптивных пород: первая — основная группа, преимущественно вулканическая, но включающая также траппы и серпентиниты, и вторая — кислая, преимущественно плутоническая и гранитная. Каждая группа сопровождается собственной свитой характерных минерализаторов, минеральных месторождений и породообразующих минералов (стр. 1253, 1254, 1288). Существуют коренные отличия в способе внедрения между гранитом и другими эруптивными породами (стр. 1297). Эти положения де-Бомона являются наиболее ранним выражением идеи о существовании вулканических и плутонических ассоциаций эруптивных пород, которая недавно была высказана Кеннеди и которую я приводил в прошлогоднем докладе.

Эманации, с которыми имел дело Эли де-Бомон, рассматриваются им как летучие субстанции, способные к переносу силикатных и металлических веществ за пре-

---

<sup>1</sup> P. Fallot, *Elle de Beaumont et l'évolution des sciences géologiques au Collège de France*, *Am. des Mines*, 15, 13-th Series, 75—107, 1939.

дела активной зоны тепла и, поскольку они могут свободно проникать сквозь тончайшие поры пород, они должны находиться в состоянии паров или растворов. Они имеют то же происхождение, что и лава, которая выносит их в более высокие горизонты земной коры из внутреннего горнила земли (стр. 1250, 1274, 1275, 1281, 1288).

Действие этих эманаций хорошо видно внутри и вокруг гранитных тел, с которыми связаны оловоносные жилы. Имеются общие черты в составе элементов, входящих в эти граниты, в оловоносные жилы и в метаморфизованные боковые породы. Таким образом, возникает, как говорит Гумбольдт, «гранитный ореол» («*aura granitica*» или *répombre du granite*), в котором химические реакции и кристаллизация протекают с необычайной энергией. Это ведет к тому, что породы, находящиеся у контакта с гранитом, быстро приобретают гранитный характер и, таким образом, там возникают «вырождающиеся или уродливые формы гранита», как то: пегматит, письменный гранит и грейзен. Поскольку эманации в состоянии переносить очень тугоплавкие вещества и производить сильнейшие изменения в боковых породах, они должны быть в форме очень активного и разреженного пара (стр. 1295, 1296, 1314, 1315).

Граниты в своих контактах так часто характеризуются переходами в гнейсы и слюдяные сланцы, что все эти кристаллические породы генетически должны быть тесно связаны между собой (стр. 1301). Де-Бомон допускает предположение Вирле, что некоторые граниты имеют метаморфическое происхождение, и обсуждает вопрос о том, как эти граниты все же могут обнаруживать характерные минералы «гранитного ореола» (*Aura granitica*). Он предполагает, что осадочные породы, из которых в результате метаморфизма образовались слюдяные сланцы, гнейсы и граниты, произошли из более древних гранитов и гнейсов, так что характерные минералы были получены, так сказать, из вторых рук. Это представление о цикличности характерных минералов или элементов имеет, по моему мнению, исключительно важное значение при разработке теории гранитизации. Де-Бомон неоднократно повторяет, что происхождение слюдяных сланцев, гнейсов и гранитов — все это один общий вопрос. Он говорит:

«Таким образом вопрос о происхождении гранитов становится во много раз важнее и во много раз сложнее от того, что он включает в себя и вопрос о происхождении многих наиболее распространенных на земном шаре кристаллических пород. Это обширная проблема, и вопрос о происхождении гранитов является ее узлом» (стр. 1301).

Эта глубокая мысль была забыта многими ортодоксальными магматистами. Например, Ниггли считает, что ассоциация гранита и гнейса *усложняет* гранитную проблему. Однако, с другой стороны, для некоторых из нас эта ассоциация скорее *разъясняет* проблему. Мы возобновим этот спор позже, теперь же я возвращаюсь к последнему положению Эли де-Бомона. Он проводит четкое различие между гранитами с закаленными контактами и слабым контактовым воздействием и гранитами, окруженным жилами и штокверками. Первый тип, очевидно, обладал только слабой степенью «метаморфизирующей силы» (*la vertue métamorphisatrice*) и терял на контактах способность гранитоидной кристаллизации — «он сам, если можно так выразиться, *выдыхался*». По характеру внедрения и бедности минерализаторами они напоминают кварцевые порфиры породы основной группы. Это различие между контактными проявлениями у отдельных типов гранитов является основным вопросом гранитной проблемы и выяснение его Эли де-Бомоном является крупным вкладом в науку о петрогенезисе.

Последним автором, участвующим в разбираемом мною сборнике, является Фурне (Fournet), чьи более ранние взгляды я уже излагал раньше. В его статье «Краткие результаты изучения Вогезов», стр. 220—254, приведены некоторые данные, имеющие большую важность для нашего обсуждения. В согласии с Эли де-Бомоном Фурне совершенно уверен, что метаморфизм, связанный с гранитами, обязан как теплу, которое они приносят, так и «элементам» (*principles*), необходимым для метаморфизма, которыми они обогащают боковые породы (стр. 230). Он проводит различие между эруптивными порфирами и метаморфическими порфирами и, рассматривая происхождение пород последнего типа, затрагивает такие идеи, как капиллярное пропитывание метаморфических пород жидкостями изверженного происхожде-

ния, насыщение боковых пород порфириной пастой и образование порфириновых пород путем пропитывания с сопутствующей ему потерей сланцеватости у первичных осадков (стр. 239). Он считает, что, если куски боковой породы плавают в изверженном бассейне, их нижние части будут растворяться и, соответственно своей природе, будут таким образом придавать «особую физиономию» (*une physionomie special*) плутоническим породам. Подобного рода явления легко наблюдать в химической лаборатории. Кусок сахара, наполовину погруженный в воду, втягивает некоторое ее количество в свои верхние части, и в то же время остальная вода делается насыщенной сахаром. Выходят ли из этого общего правила плутонические породы? Являются ли они исключительными телами? Если они являются таковыми, то тогда:

«все наши рассуждения, все стоящие нам стольких усилий построения о возникновении метаморфизма, в результате контактовых воздействий, капиллярных процессов и смешения, привели бы только к созданию пустой химеры, похожей на туманные грезы, которым может предаваться наука, находящаяся только в младенчестве» (стр. 241—242).

К счастью, говорит Фурне, это не так. Необходима, однако, осторожность. Переход одной породы в другую позволяет нам делать некоторые генетические заключения, но основные черты трех главных групп пород — изверженных, осадочных и метаморфических — остаются незатронутыми. Если бы это было иначе, мы должны были бы впасть в старое заблуждение и видеть переходы гранита в уголь, порфира в песчаник и базальта в ракушечный известняк.

Эти утверждения Фурне приводят меня к двум заключениям. Во-первых, он очень ясно видел, что плутонические породы образуются не так, как если они были бы заключены в платиновом тигельке, — они должны реагировать со стенками. Во-вторых, он предостерегал против чрезмерного энтузиазма по отношению к превращениям пород, который так пылко разделяется в настоящее время некоторыми геологами. Большой вред общей гипотезе гранитизации приносит, например, некритическое приложение этих идей. Иногда мы должны спасаться от наших друзей.

После общей дискуссии, о которой я упомянул выше, Фурне разбирает, в частности, порфиры Вогезов. Он делает вывод, что метаморфизованные породы влияют на метаморфизирующие породы, т. е. они взаимно воздействуют друг на друга. Это приводит его к одному из его самых главных положений.

Метаморфизм, говорит он, представляет собой общую сумму всех процессов, происходящих как в плутонической породе, так и боковой породе контакта. Изменения плутонической породы представляют собой эндоморфизм, изменения вмещающей породы — экзоморфизм (стр. 243). Он, таким образом, ввел два термина, которые остались специфически французскими, так же, как, я боюсь, и те идеи, которые в них заложены. Для Фурне и его современников было, следовательно, совершенно естественным, что плутонические породы должны изменять текстуру и состав в результате реакции с боковыми породами, приобретая таким образом «специфическую физиономию».

В том же 1847 г. появился немецкий перевод замечательных работ Фурне о метаморфизме, сделанный В. Фогельзангом. Перевод озаглавлен: «Метаморфизм пород западных Альп»<sup>1</sup> и имеет предисловие, написанное Б. Котта, которое стоит отметить. Котта допускает, что толща осадочных пород, если она обладает достаточной мощностью, должна войти в область влияния внутреннего жара земли и может расплавиться, дав эруптивные породы, которые могут произвести контактовый метаморфизм. Крупные гранитные массы должны действовать таким же образом, хотя и в меньших масштабах, и также приводить к возникновению кристаллических сланцев и даже эруптивных пород. Котта, однако, жалеет, что он не может вспомнить местонахождения подобного превращения пород в сколько-нибудь крупных масштабах.

Среди прочих явлений Фурне описывает сложные жилы в боковых породах, переходные зоны между вмещающей породой и эруптивной породой (стр. 6), фельд-

<sup>1</sup> W. Vogelsang, Die Metamorphose der Gesteine nachgewiesen in den westlichen Alpen, Freiberg, 1847.

шпатизацию, импреньяцию вмещающих пород (стр. 12) и рост порфиробластического полевого шпата в роговике (стр. 13). Его теоретические рассуждения содержат обильный материал, который для изучающих метаморфизм имеет большой интерес. Он, например, делает попытку выделить несколько типов зон метаморфических пород. Он старается, правда, не особенно успешно, выделить зоны метаморфизма глинистых сланцев по их цвету (стр. 37). Рассматривая положение различных битуминозных пород Западных Альп, он выводит особый вид их зонального расположения около центральной плутонической оси, т. е. оси, вдоль которой имеет место приближение внутреннего жара земли; однако он кончает призывом к дальнейшему сбору фактов (стр. 36). Вероятно, это было одним из самых ранних объяснений метаморфической зональности.

Рассматривая результаты плутонического воздействия на глинистые породы, Фурне отмечает, что, поскольку глинистый сланец содержит калий, натрий и кальций, весьма возможно, что полево́й шпат возникает благодаря простой перекристаллизации. Однако в некоторых случаях развивается так много полевого шпата, что, повидимому, кроме того, должна происходить импреньяция полевого шпата посредством некоторого рода капиллярного процесса (стр. 72). Он различает, далее, два типа процессов в образовании этих контактовых пород. Это различие, как мы увидим дальше, сыграло важную роль в последующем развитии идей французской школы в отношении гранитных контактов. Фурне устанавливает различие между *инъекцией*, при которой прожилки следуют вдоль плоскостей сланцеватости, и *капиллярным пропитыванием* боковых пород горячими флюидами (стр. 73—74). Вещества, участвующие в пропитывании, с исключительной легкостью проникают в боковые породы и вызывают в них важные химические реакции (стр. 76).

Наконец, Фурне указывает, что степень метаморфизма зависит от близости плутонического очага. Однако во многих районах метаморфизм имеет такое широкое развитие, что его довольно трудно связать с каким-либо эруптивным телом, которое принесло тепло и те вещества, которые необходимы для метаморфизма. Поэтому проще допустить, что наблюдающееся преобразование пород

совершается благодаря воздействию потоков горячих газов (стр. 98).

Для 1847 г. это очень много. Мы видели, таким образом, как все эти разнообразные семена были посажены. Одни из них засохли и погибли, другие выросли и дали ярчайшие цветы французской геологии. Прежде чем сорвать букет этих цветов, я должен отметить, что эти нежные растения были выращены целым рядом французских геологов. Одним из них является Делесс.

В своих «Этюдах о метаморфизме горных пород» (1858) Делесс различает два больших класса метаморфических явлений — явления нормального или общего метаморфизма (наш региональный метаморфизм) и явления аномального или специального метаморфизма (наш контактовый или термальный метаморфизм). В контактовом метаморфизме, как это говорится в сборнике 1858 г., действующими агентами являются тепло и газы, пары или растворы (стр. 3). Но тепловому эффекту, по его мнению, придается преувеличенное значение. Он замечает, что на гранитных контактах контактовый метаморфизм смешивается с региональным (стр. 5). Его трактовка этих контактов соответствует, естественно, идеям французской школы. Среди других интересных вещей он, на основании изучения парижских тротуаров, описывает развитие гранитных минералов в обломках боковых пород и вспоминает, что Котта в 1857 г. отметил рост крупных кристаллов ортоклаза в диоритовых обломках, находящихся в гранитах Тюрингенского леса (стр. 316). Такая же фельдшпатизация отмечена в районе Сен-Готтарда, в Норвегии, в Вогезах и многих других местах (стр. 362—364). Во многих случаях пелитовые осадки в результате процесса фельдшпатизации переходят в «настоящий гранитоидный порфир» (*un véritable porphyre granitoïde*). Когда развивающийся полевой шпат является ортоклазом, он обычно сопровождается гранитными минералами; в этом случае, по выражению Кейльгау, метаморфизм выражается в гранитизации (стр. 354). Этот тип метаморфизма проявляется обычно в гигантских масштабах и сливается с региональным метаморфизмом (стр. 364).

В «Этюдах о метаморфизме горных пород» (1869) Делесс разбирает свой общий метаморфизм или наш

региональный метаморфизм. Здесь он выдвигает некоторые идеи относительно плутонических пород, имеющие для нашей настоящей дискуссии особый интерес. Его наиболее важное предположение заключается в том, что плутонические породы являются не причиной, а результатом метаморфизма. Он говорит:

«Плутонические породы образовались за счет метаморфических пород, и они представляют собой продукты наиболее интенсивного или наиболее высокотемпературного общего метаморфизма».

Когда плутонические породы залегают в жилах, они порождают слабый метаморфизм и этот слабый метаморфизм Делесс называет специальным метаморфизмом. Однако, когда они залегают в больших массах, они незаметно переходят во вмещающие породы и окружаются огромными зонами метаморфизма. Слабый метаморфизм приводит к возникновению слабо метаморфизованных сланцев и тому подобных пород, в то время как при сильном метаморфизме образуются высокометаморфизованные породы и плутонические породы (стр. 88, 89). Затем Делесс делает следующее наблюдение, связывающее более ранние взгляды, как, например, взгляды Эли де-Бомона, с некоторыми выводами, о которых мы будем говорить дальше:

«Эти последние (т. е. плутонические породы, возникшие в результате метаморфизма на высоких энергетических уровнях), обладавшие большей пластичностью, частично вели себя как изверженные породы. Они снова вышли на поверхность под действием внутреннего давления. Но тогда они уже не соприкасаются ни с соответствующими им метаморфическими породами, ни с породами, за счет которых они образовались. Это, впрочем, наиболее обычный случай» (Делесс, стр. 89).

Иными словами, секущие граниты высоких горизонтов земной коры могут потерять все признаки, по которым можно было бы определить их действительное происхождение — прекрасная мысль!

В течение последней четверти XIX века французская школа получила расцвет в работах Мишель-Леви, Барруа, Лакруа, Дюпарка и других. Когда теперь геологи ссылаются на французскую школу гранитизации, употребляя этот термин в широком смысле, они обычно имеют в ви-

ду работы этого периода. Однако великие мысли и достижения этого времени стали возможными только потому, что они развились из опыта первых трех четвертей столетия; идеи об инъекции, имбибиции, ассимиляции и тому подобных процессах стали частью французского геологического мышления. В такой благоприятной атмосфере Мишель-Леви и Лакруа создали те работы, которые придали французской школе еще больше блеска.

Однако прежде чем мы перейдем к их рассмотрению, я хочу напомнить, что в эти времена вне Франции маршировала в полном боевом порядке, выражаясь словами Седергольма, «Гейдельбергская микропетрографическая школа», возглавляемая ее знаменитым вождем Розенбушем и поддерживаемая усердным хором ее многочисленных европейских и американских приспешников. Временные успехи этой школы были весьма значительными. Мы должны помнить, что в это время французская цитадель «гранитизации» осталась все же нерушимой после всех атак, благодаря главным образом блестящим «вылазкам» Мишель-Леви и Лакруа. Мы можем здесь подробно рассмотреть только две такие «кампании», первую из которых вел Мишель-Леви, об идеях Эли де-Бомона в Колежде-Франс и вторую — Лакруа — в Музее.

Я выбрал для специального рассмотрения только одну из большого числа работ Мишель-Леви — именно, его классическую работу о Фламанвиле<sup>1</sup>. Во Фламанвиле, в департаменте Котантен, на западном берегу Шербурского полуострова, палеозойские осадки прорваны небольшой массой гранита, которая дала хорошо выраженные контактовые явления.

Следуя своим предшественникам из французской школы, Мишель-Леви отмечает два типа контактовых процессов: инъекцию (*par injection*) и наложение (*par superposition*), и определяет их следующим образом:

«Путем проникновения, когда тонкие полевошпатовые прожилки проникают послойно (*lit-par-lit*) в сланцеватую породу, которая была предварительно превращена в слюдяной сланец.

<sup>1</sup> A. Michel-Lévy, Contribution à L'étude du granite de Flamanville et des granites français en général, *Bull. Carte Géol. Fr.*, 5, 1893—1894.

Путем наложения, когда более крупные элементы гранита как бы взрывают элементы слюдяных сланцев и обволакивают их обломки с образованием включений» (стр. 4).

Силурийские осадки превращаются на контактах в полевошпатовые породы и затем переходят в гнейсы и микрограниты (стр. 6), а сами граниты претерпевают эндоконтактовый метаморфизм с развитием сланцеватой текстуры и появлением в большом количестве железомagneзиальных минералов (стр. 9).

Вооруженный опытом изучения других гранитных контактов, обновленным наблюдениями в Фламанвиле, Мишель-Леви переходит к дискуссии о гранитах вообще. Предварительно он заявляет (стр. 17), что только структура и минеральный состав являются необходимыми факторами для точного определения гранита. Это заявление следует продумать. Следующим вопросом, который привлекает его внимание, является вопрос о том, что делается на гранитных контактах. Здесь преобладающими агентами являются минерализаторы, которые оказывают дифференциальное воздействие на различные боковые породы (стр. 18, 21). Непосредственно на контактах эффект переноса материала виден невооруженным глазом: здесь возникает зона фельдшпатизации, в которой находятся различные гнейсы (стр. 21). Из опыта французских исследователей ясно, что взгляды Розенбуша о том, что фельдшпатизация на гранитных контактах не встречается и что в таких контактах гнейсы не образуются, безусловно, ошибочны (стр. 21—22).

Эта фельдшпатизированная зона имеет огромное теоретическое значение. В ней как бы в синтетически воспроизведенном виде присутствуют все типы и все условия образования кристаллических сланцев и во многих случаях эти разнообразные кристаллические породы могут быть сопоставлены с различными по составу слоями боковых пород. Мишель-Леви отмечает, что Барруа в тогда еще неопубликованных отчетах о листах Бреста и Морле привел неопровержимые примеры преобразования целых участков (regions) докембрийских отложений в гнейсы путем гранитизации. Пачки кварцита, более устойчивые по отношению к гранитизации, прослеживаются среди превращенных в гнейсы более глинистых

пород. «Стало быть здесь эквивалентность гнейсов и сланцев с явно обломочным материалом, из которых они произошли в результате соседства с гранитами, подтверждается стратиграфией» (стр. 23).

Изучение включений в гранитах подкрепляет эти выводы. Однако в результате этого изучения выявляются новые, весьма существенные факты. Во включениях в гранитах были найдены огромные кристаллы ортоклаза, так называемые «лошадиные зубы», сходные с теми, которые встречаются в самом граните и придают ему порфиривидный облик. Иногда эти кристаллы беспорядочно рассеяны в веществе включения, иногда они ориентированы по сланцеватости, которая вырисовывается благодаря расположению гранулитовых и биотитовых элементов. Такие «узловатые гнейсы» не могут образоваться, как это напрасно думает Розенбуш, путем динамометаморфизма, поскольку сам гранит не обнаруживает признаков рассланцевания.

Эта стычка с Розенбушем возобновляется позже, в связи с интерпретацией краевых сланцеватых разновидностей гранитов, встречающихся на многих контактах. Розенбуш и его последователи считали, что эти различия являются результатом динамометаморфизма; Мишель-Леви показывает, что они обязаны своим происхождением импренциям первоначально сланцеватых пород гранитными элементами, т. е. что сланцеватость в гранитах является реликтовой. Мишель-Леви демонстрирует это тремя сериями фактов: 1) идентичностью этих сланцеватых гранитов с некоторыми включениями, 2) ясными химическими изменениями, которые не могут быть объяснены динамометаморфизмом, и 3) огромным различием, существующим между этими сланцеватыми краевыми гранитами и теми гранитами, которые действительно претерпели динамический метаморфизм, как, например, граниты Монблана. Я привожу подробно эти аргументы потому, что даже теперь точка зрения Розенбуша до некоторой степени остается в силе. Путем сравнительного изучения гранитов Морван, Божеле, Овернь и Монблана Мишель-Леви показал, что фельдшпатизированная зона вокруг гранитов с глубиной увеличивается до тех пор,

пока контактовые зоны не становятся до некоторой степени зонами образования гранитов (стр. 22, 24).

Мы уже видели, что Эли де-Бомон и другие ученые того времени ясно сознавали коренное различие между основными и вулканическими породами, с одной стороны, и кислыми и плутоническими, — с другой, что является ранним выражением идеи о вулканических и плутонических ассоциациях. Мишель-Леви подчеркивает это различие. В его «Структурах и классификации эруптивных пород» (1889), которая является главной полемической работой, направленной против Розенбуша, он отвергает взгляд о каком бы то ни было прямом родстве между гранитными породами глубин и вулканическими породами на поверхности. Вулканические жерла ничего общего не имели с «гранитными образованиями» (*appareils granitique*). Он подкрепляет этот вывод.

«Итак, мы не можем не настаивать на отсутствии стратиграфической или петрографической связи между лакколитами, настоящими вулканическими образованиями, жилами и силлами, с одной стороны, и гранитными массивами — с другой» (стр. 35).

Последний тезис Мишель-Леви касается механизма внедрения и проблемы пространства (*mise en place*) у гранитов. Концепцию Зюса, что гранитные батолиты образуются в результате простого заполнения пространства, образующегося при тангенциальных движениях, является ошибочной, поскольку доказано, что граниты расширяются вниз и «образуются за счет прилегающих формаций, которые в свою очередь становятся сами все более и более кристаллическими и похожими на граниты» (стр. 36). Изучение показательных обнажений, например большого карьера Дьелет в Фламанвиле, показывает, что граниты очень медленно прокладывают себе дорогу, не производя никаких нарушений в толщах, в которые они внедряются. «Все говорит в пользу расплавления и разжижения соседних зальбандов с медленной частичной ассимиляцией их изверженной породой (стр. 36). Неоднородность краевых частей гранитов возникает благодаря неполному усвоению множества обломков боковых пород. Граниты местами заполнены обломками тех пород, которые встречаются поблизости. Например,

в некоторых местностях Франции граниты обнаруживают узелки кордиерита, имеющие общее региональное удлинение; эти узелки являются единственными реликтами боковых пород, которые были поглощены на месте.

Кажется, говорит Мишель-Леви, что восхождение гранитной магмы происходит благодаря какому-то плавлению, ассимиляции или разъеданию окружающих пород, вызываемыми теплом и минерализаторами, пришедшими из магмы. Первые стадии выражаются в омоложении кварца и образовании в контактовых породах черной слюды. Затем происходит фельдшпатизация, образуются кварцевые и полевошпатовые прожилки, количество которых возрастает до тех пор, пока они сливаются вместе и их уже нельзя отделить от гранита. При этом все элементы контактовых сланцев делаются подвижными. Мишель-Леви заключает:

«Другими словами, на глубине контактовый метаморфизм мало-помалу сливается с общим метаморфизмом. Они объединяют свое действие, и если бы мы предположили, что эрозия зашла достаточно глубоко, то мы бы дошли до того, уровня, на котором гранитные магмы должны были бы расплавить все породы, слагающие своды (voussoirs) земной коры. Отсюда следует, что обрушившиеся части сводов более или менее ассимилируются изверженной породой и превращаются в гранито-гнейсы, потом в гнейсовидные граниты и, наконец, в граниты» (стр. 39).

Мишель-Леви в своих полевых и лабораторных работах дает оценку представлениям своих предшественников эпохи домикроскопической петрологии. Он тщательно изучил имбибицию, инъекцию, воздействие *lit-par-lit*, фельдшпатизацию, эндоморфизм, унаследованные структуры и глубинные явления. Однако важнейшим вкладом были собственные его взгляды на способ образования гранита на месте, в результате постепенного преобразования боковых пород до тех пор, пока они не станут похожими на гранит и не произойдет объединения этого материала с гранитной магмой. Очень трудно определить, насколько процесс, описываемый Мишель-Леви, подходит под мое определение гранитизации. Для него гранитная магма всегда существует в действительности лишь на верхних горизонтах, в то время как на глубине гранитная магма может образовываться благодаря плавлению боковых

стенки. Ясно, однако, что значительная часть его фельдшпатизированной зоны и его эндоморфических гранитов может подчиняться моему требованию в том отношении, что они не прошли через магматическую стадию.

Из касающихся того же вопроса работ Лакруа я возьму для рассмотрения две широко известные статьи о гранитных контактах в Пиренеях<sup>1</sup>. Из изучения хорошо обнаженных контактов гранита с весьма различными боковыми породами Верхних Пиренеев Лакруа выводит общую приложимость выводов Мишель-Леви относительно контактовых явлений и способа водворения (emplacement) гранитов. Лакруа (стр. 48) противопоставляет точку зрения французов, которая была развита Мишель-Леви и им самим, с точкой зрения немцев, отстаиваемой Розенбушем. Стоит изложить словами Лакруа существо этих двух позиций.

Согласно французским петрографам (Лакруа, I, стр. 48):

«Контактовые явления изверженных пород заключаются в изменении ранее существовавшей породы, обладавшей специфическими, присущими ей свойствами, под влиянием минерализующих агентов, по большей части сопровождающихся летучими или растворенными элементами, которые, задерживаясь в изменяемой породе, более или менее полно преобразовывали ее химический состав».

Согласно немецким петрографам (Розенбуш, *Mikr. Phys.*, 2, 85, 1896):

«Можно формулировать закон, что при контактовом метаморфизме изверженная порода, взаимодействуя с глубинными породами, действовала только чисто физически, совершенно не воздействуя химически. Химический анализ контактовых пород в различных стадиях их преобразования показал, что за исключением летучих веществ, как, например, воды и углекислоты, в их составе изменений не произошло. В действительности все свелось к молекулярным перераспределениям. Изверженная порода является причиной этого перераспределения, вызывая своим появлением новые условия температуры и давления, а осадочная порода дает материал для этого перераспределения».

Лакруа обращается только к тем фактам, которые обнаруживаются при полевых наблюдениях.

<sup>1</sup> A. Lacroix, Le Granite des Pyrénées et ses Phénomènes de Contact; Premier Mémoire, *Bull. Ser. Carte Géol. France*, 64, 10, 1898—1899, Deuxième Mémoire, 71, 11, 1899—1900.

Он напоминает, что в большом количестве контактов, описанных им самим в Пиренеях, а Мишель-Леви и Барруа — во многих других местах, постоянно присутствует зона фельдшпатизации, образовавшаяся в непосредственном контакте гранита, благодаря процессам имбибиции и инъекции. В этой зоне возможно найти все последовательные стадии фельдшпатизации и проследить все незаметные переходы от фельдшпатизированных сланцев (лептинолитов) до самих гранитов. Однако даже в наиболее фельдшпатизированных участках, где образовались настоящие гнейсы, можно распознать остатки боковых пород, находящиеся на промежуточной стадии преобразования (стр. 49). Эти явления настолько часто можно видеть во Франции, что Лакруа удивляется тому, как могут существовать другие взгляды по этим вопросам. Однако он говорит: «Я ни в коем случае не стану смешивать возможность для магмы производить интенсивную фельдшпатизацию с необходимостью для нее обязательно воздействовать таким образом на осадочные породы, находящиеся с ней в контакте» (стр. 50).

Известно, что некоторые граниты дают как бы обретенные ножом контакты с прилегающей к ним зоной роговиков. Ясно, что эти различия в типах контактов обусловлены различиями в количестве минерализаторов, физическими условиями на контактах и, в особенности, разной глубиной. Перенос материала очевиден (стр. 51), например, при образовании метаморфизованных известняков, богатых калиевым полевым шпатом. Здесь перенос материала обязательно должен иметь место.

Лакруа соглашается с Мишель-Леви<sup>1</sup>, что магма состоит из двух частей — одной, которая затвердевает в виде обыкновенных порообразующих минералов, и другой, остающейся свободной, когда это затвердевание происходит, и состоящей из летучих элементов, которые способны глубоко изменять боковые породы, соприкасающиеся с глубинными магмами. В пиренейских контактах ясно видно, что элементы, внесенные в боковую породу вместе с теми веществами, которые содержались в ней ранее, дают породу, очень близкую по составу к самому

<sup>1</sup> *Bull. Soc. Géol. France*, 25, 1897.

граниту. Растворение гранитной магмой этого измененного материала не изменяет состава самой магмы. Таким образом, гранитная магма представляет собой результат ассимиляции сланцев, а не является первичной чистой магмой (1, стр. 56, 57).

«Растворив сланцы, магма должна была иметь тот же состав, что и затвердевшие граниты, с добавлением летучих частей, освобожденных в момент затвердевания породы» (стр. 87).

Если поглощаются глинистые породы, то гранит обогащается биотитом, если поглощаются известковистые породы, то гранит становится более основным.

Наиболее дискуссионная часть пиренейской работы Лакруа касается эндоморфизма<sup>1</sup> гранита, происходящего в результате взаимодействия с известняками. После растворения всех других пород в гранитах остаются линзы известняков, с которыми тесно ассоциируют тела роговообманковых гранитов, диоритов, оливиновых норитов, роговообманковых перидотитов, т. е. тела разнообразных плутонических пород (1, стр. 59) Мишель-Леви<sup>2</sup> отметил в общем такую же ассоциацию в Божеле, Пюи дю Дом и высказал предположение, что здесь имеет место эндоморфизм в результате взаимодействия гранита с известковистыми породами. Он считал, что этот процесс в комбинации с фельдшпатизацией играет главную роль в эволюции магм, дающих эруптивные породы. Предположение Мишель-Леви, конечно, полностью противоположно, по его выражению, «различным теориям дифференциации в закрытом сосуде (*en vase clos*), которые сейчас в большом почете у петрографов». В закрытом сосуде — это то, что я раньше называл «в платиновом тигельке».

Лакруа (1, стр. 59) с осторожностью говорит, что он не хочет утверждать, что все эти разновидности плутонических пород повсюду обязаны своим происхождением ассимиляции известняков гранитной магмой, но он справедливо настаивает на том, что его полевые наблюдения показывают на возможность таких преобра-

<sup>1</sup> Или, как у нас больше принято говорить, — эндоконтактового метаморфизма. (Прим. перев.)

<sup>2</sup> *Bull. Soc. Géol. France*, 24, 123, 1896; 25, 369, 1897.

зований. Каждый раз, повторяет он (1, стр. 60), когда в гранитах находят линзы известняков, они всегда окружены периферической зоной богатых амфиболом пород, и, с другой стороны, последние присутствуют только вокруг известняков или на линии простираения их выходов.

Лакруа далее соглашается с взглядами Мишель-Леви на способ внедрения гранитов (*mise en place*) в том смысле, что граниты образуются путем прогрессирующей ассимиляции боковых пород, чье место они в конце концов и занимают. Убедительным доказательством этого тезиса является факт сохранения включениями их первоначального положения (1, стр. 62). В долине Баксуийяд легко шаг за шагом проследить пропитывание и гнейсификацию сланцев, дающих местами непрерывный ряд ксенолитов среди породы, которая по своему составу колеблется между гнейсогранитом и гранитоидным гнейсом (1, стр. 63). Таким образом, в пиренейских контактах перемешивания не происходило, в то время как гранит достиг своего верхнего предела. Это значит, что продукты эндоморфизма (эндоконтактового метаморфизма. — *Ред.*) остаются в непосредственной близости от интересующих нас включений.

Лакруа обращает особое внимание на высокую ценность полевых доказательств, как он говорит, того, что «мы можем трогать рукой», и добавляет, что это не является «только простым продуктом воображения» (2, стр. 26). Постепенный подъем гранитной магмы характеризуется следующим образом:

«По мере того как гранитная магма поднималась среди пластов осадочных пород, ей предшествовала и ее сопровождала свита преобразующих эманаций; таким образом, те породы, которые магма должна была растворить, чтобы занять их место, были уже не нормальными осадочными породами, а породами, измененными или изменяющимися благодаря пропитыванию их этими эманациями, вышедшими из ее собственной массы» (2, стр. 26).

Лакруа подчеркивает преобладание пропитывания (*imbibition*) над инъекцией в фельдшпатизирующихся и гранитизирующихся зонах (2, стр. 27). Он еще раз подчеркивает коренное различие в отношениях к гранит-

ной магме пелитовых и известковистых боковых пород. Первые фельдшпатизируются до тех пор, пока не приобретают гранитный состав (2, стр. 27) и, таким образом, при поглощении их магмой последняя изменяется очень мало. Известняки же, превращаясь не в фельдшпатизированные породы, а в известковые силикаты, естественно, изменяют состав гранитной магмы, которая затвердевает в виде более основных plutонических пород (2, стр. 29—30).

Нетерпеливый читатель, недостаточно оценивающий извилистый и вольный ход моих или чьих-либо других размышлений, может заявить, что я отвел французской школе и в частности Мишель-Леви и Лакруа слишком много места. Я отвечаю, что я сознательно так подробно рассмотрел эволюцию взглядов этой школы и ее расцвет в восьмидесятых и девяностых годах прошлого столетия по той причине, что английская и американская точки зрения на этот предмет сводились, до последнего времени, по существу к немецкой точке зрения. Даже те из нас, которые на словах воздают должное французской школе, имеют только поверхностное знакомство с ее основными положениями. Я должен еще сказать об этой школе, разобрав работу Термье.

Рассматривая взгляды на метаморфизм и plutоническую деятельность, которые развивал Термье, мы замечаем некоторые различия между ними и теми взглядами, которые развивали его предшественники. Начнем с того, что Термье<sup>1</sup> считает, что региональный метаморфизм — это нечто совсем другое, нежели усиленный контактовый метаморфизм Мишель-Леви и Лакруа. Интрузия эруптивных пород является только эпизодом в процессе регионального метаморфизма; интрузия и метаморфизм в действительности являются только двумя следствиями одной и той же причины.

«Если на Монблане имеются гнейсы и слюдяные сланцы, то это не потому, что там имело место внедрение гранита. Наоборот, гранит образовался среди этих

<sup>1</sup> P. Termier, Les schistes cristallins des Alpes occidentales, C. R. IX Congrès Géol. Internat., Vienna, 1903, 583—585 (1904).

отложений под действием той же причины, которая превратила осадочные породы в кристаллические».

Региональный метаморфизм получается благодаря знаменитому механизму «масляного пятна» (*tâche d'huile*), при котором приносящиеся из глубины элементы неравномерно проникают в осадочные слои геосинклинальной толщи, подобно тому как масло неравномерно распространяется сквозь слои толщи различных тканей (стр. 585). Приток вещества виден ясно: «этот привнос идет от фильтрующих колонн, поднимающихся снизу, как из котла, из глубины центральной части геосинклинали» (стр. 585). Появление полевого шпата является несомненным доказательством переноса материала<sup>1</sup>. Но для целых серий кристаллических сланцев, утверждает Термье, происходил, несомненно, новый приток материала из глубины, который достигал и изменял часть более старого материала, находившегося впереди. Это «мигматитовый фронт» современных нам авторов. При своем прохождении вверх эти ювенильные пары, «настоящие фильтрующие колонны» (*véritables colonnes filtrants*) с различными газами, силикатами и боратами щелочей повышают температуру окружающих пород, что вместе с обилием растворителей приводит к интенсивным химическим реакциям. Смеси с низкой температурой плавления растворяются первыми, в то время как старые элементы, присутствующие в избытке, движутся впереди «фильтрующей колонны» и вызывают, в свою очередь, перемещение других элементов. Таким образом, в отдельных местах образуются настоящие магмы, имеющие различный объем, который увеличивается с глубиной. Когда весь район остынет, участки, которые сделались жидкими, закристаллизуются в виде массивных пород — гранита, габбро, диорита и других, — отвечающих тем семействам изверженных пород, которые соответствуют эвтектике.

В верхних частях структуры образуются кристаллические сланцы, а оставшиеся еще жидкими магматиче-

<sup>1</sup> Sur la genèse des terrains cristallophylliens, C. R. XI Congrès Géol. Internat., Stockholm, 1912.

ские порции могут внедриться в более высокие горизонты с образованием секущих контактов (стр. 592—593).

Для Термье, таким образом, образование изверженных пород есть только эпизод регионального метаморфизма. Единственным критерием абиссального происхождения являются амплитуда и интенсивность метаморфизма, проявления которого окружают изверженные породы и которые, на первый взгляд, кажутся происшедшими из этих последних. Если гранит окружен узким ореолом, ясно, что он не мог образоваться *in situ*, т. е. он в готовом виде пришел откуда-то из другого места. Если, с другой стороны, гранит окружен широким ореолом метаморфических пород, он, несомненно, образовался на месте в результате полного плавления эвтектики, в то время как соседние породы подверглись региональному метаморфизму.

Главное различие (но лишь по некоторым вопросам) между Термье, с одной стороны, и Мишель-Леви и Лакруа, — с другой, касается способа образования гранитной магмы. По Термье, она рождается в результате усиления тех же процессов, которые приводят к образованию кристаллических сланцев и гнейсов; для Мишель-Леви и Лакруа граниты приходят из глубины и сами являются ответственными за тот сильный метаморфизм, который их окружает. Мне кажется, что их взгляды на то, что делается на глубине, так же как и на характер контактового и регионального метаморфизма, в значительной степени сходятся.

Современные французские геологи, как, например, Демей, Рагэн Лоншамбон, Жюнг (Jung), Рок (Roques) и другие, хотя в некоторых отношениях и развивают классические взгляды французской школы, но в большей своей части имеют много общего с фенноскандинавскими исследователями, к изложению взглядов которых я сейчас перейду. Поэтому я не могу здесь, к сожалению, сделать ничего иного, как рекомендовать вашему вниманию их труды.

Как мне кажется, тот большой вклад французов в нашу науку, который они сделали в течение последнего столетия, сводится к следующему. Во-первых, они

ввели в круг геологического мышления (если только геологи не заключали свои мысли в «закрытый сосуд») представления об эманациях, минерализаторах, летучих и т. п., как об агентах огромной важности в метаморфических и плутонических явлениях; во-вторых, они проанализировали гранитные контакты с таким совершенством, что их идеи, имеющие столетнюю давность, и их терминология до сих пор не вышли из употребления. В-третьих, они отказались от веры в то, что магма не воздействует на боковые породы, и продемонстрировали существование взаимных экзоморфных и эндоморфных процессов, имеющих огромное значение. В-четвертых, они доказали, что существуют различные типы гранитных контактов, то резких, то неясных, то без переноса вещества, то с огромным переносом, и этим показали единство явлений, вызываемых гранитом. Делая это, они освободили нас от непоследовательных и чрезмерных экстраполяций Розенбуша и его последователей. Сравните красоту и широту французских идей об отношениях между глубиной и характером гранитных контактов с бесплодной холодностью исследователя Барр-Андлау<sup>1</sup>. В-пятых, они показали, что ассоциация метаморфических пород, гнейсов, слюдяных сланцев и др. с гранитами имеет генетическое значение, а не представляет случайное явление. В-шестых, они установили важность и значительность фельдшпатизации как петрогенетического процесса. В-седьмых, они предложили механизм формирования гранитов, который разрешает неразрешимую иначе проблему пространства для гранитных интрузий. Наконец, они впервые оценили коренное различие между преимущественно основной вулканической ассоциацией, с одной стороны, и преимущественно кислой плутонической ассоциацией — с другой.

Этими достижениями должен гордиться каждый последователь французской школы, будь он француз или нет.

<sup>1</sup> Имеется в виду известная работа Розенбуша о контактных явлениях в гранитах Барр-Андлау, в которой автор приходит к выводу об отсутствии явления переноса вещества при контактном метаморфизме. (Прим. ред.)

## ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ВКЛАД

В этом разделе я хочу ознакомить вас с некоторыми работами финских, шведских и норвежских геологов, являющихся знатоками мигматитов. Поскольку я хочу осветить результаты главным образом новых работ, производившихся в этих странах, я не буду разбирать взгляды Кейльхау (Keilhau) и Шерера (Scheefer), выдвинутые больше ста лет назад, или Кьерульфа (Kjerulf) и Реуша (Reusch), выдвинутые больше пятидесяти лет назад. Я начну с Седергольма.

В первой части моих «размышлений о гранитах», где я говорил о происхождении гранитной магмы, я разобрал различные стороны проблемы мигматитов: ихоры, анатексис, палингенез и т. п., которые были изучены крупным финским геологом И. И. Седергольмом (1863—1934). Главные работы Седергольма сосредоточены в четырех крупных сборниках журнала «Commission géologique de Finlande». Его многочисленные предварительные отчеты, сводки и критические заметки печатались также в различных не финских изданиях. Четыре работы, которых мы коснемся, это, во-первых, классическая статья «О гранитах и гнейсах»<sup>1</sup>, написанная на шведском языке и имеющая английское резюме на двадцати страницах; и затем напечатанные по-английски три тома труда «О мигматитах и ассоциирующихся с ними докембрийских породах юго-западной Финляндии»<sup>2</sup> (в дальнейшем я буду называть их «Мигматитами» I, II и III). Последний из этих трех томов был опубликован уже после смерти Седергольма. Эти четыре работы сопровождаются сотнями рисунков обнажений, показывающих поразительную сложность финского докембрия, так что даже простое перелистывание их страниц дает хорошее представление о возможностях мигматизации. Здесь, однако, я коснусь, только той части работ Седергольма, которая имеет непосредственное отношение к нашей задаче, оставляя в

<sup>1</sup> Om Granit och Gneiss, *Bull. Comm. Géol. Finlande*, 23, 1907.

<sup>2</sup> On Migmatites and Associated Pre-Cambrian Rocks of Southwestern Finland, 58, 1923; 77, 1926 and 107, 1934.

стороне его исследования финляндских гранитных комплексов.

Так же как Мишель-Леви и Лакруа, Седергольм насколько я знаю, нигде не дает точного определения гранитизации, хотя и многократно употребляет этот термин. Он, например, ссылается на гранитизационную теорию Мишель-Леви и объявляет себя «одним из самых энергичных ее приверженцев» (I, стр. 13). Поэтому мы должны постараться сами понять из его работ, что он понимает под гранитизацией. Я уверен, что это может быть сделано с успехом. Практически во всех случаях гранитизация для Седергольма есть процесс, ясно связанный с гранитной магмой, которая и является его причиной. Так, он говорит: «явления гранитизации, вызванные не менее чем пятью различными типами гранитов» (I, стр. 17); «явления гранитизации гранита Ханко» (Hangö, I, стр. 100); «иногда бывает трудно сказать, обязана ли гранитизация гранитам Ветскер (Vättskar) или гранитам Рисскэр» (Rysskär, I, стр. 197); «гранитизация при образовании гранитов Ханко»; «процессы гранитизации, которые связаны с внедрением различных гранитов» (стр. 36). Рассмотрение того, что собой представляет эта гранитизация, показывает, что она включает в себя все процессы смешения, ведущие к возникновению пород, которые Седергольм называет мигматитами. Он, например, описывает ряд типичных примеров гранитизации, вызванной этими гранитами, которая начинается на той стадии, когда два компонента ясно самостоятельны, и заканчивается образованием смешанных пород (стр. 101—102). Типичные примеры, которые дает Седергольм, включают в себя: образование прожилков, инъекцию *lit-par-lit*, растворение вдоль прожилков, развитие пятен (*patches*) гранита в боковых породах, образование эруптивных брекчий или агматитов и эндоморфизм (эндоконтактовый метаморфизм) самой гранитной магмы (стр. 102—110). В другом месте образование эруптивных брекчий названо «стадией гранитизации». Далее (II, стр. 55), приведен пример гранитизации в результате инъекции «аплитовых жил, которые настолько густо проникают в более древние породы, что превращают их в мигматиты» (курсив

мой). Мне представляется, что для Седергольма гранитизация и мигматизация более или менее эквивалентны друг другу.

Мы должны рассмотреть мигматизацию несколько детальнее.

В предварительной статье «О гранитах и гнейсах» Седергольм определяет мигматит следующим образом:

«Автор предлагает название *мигматиты* для гнейсов, которые характеризуются присутствием двух элементов различного генетического значения: 1) сланцеватыми, осадочными или рассланцеванными изверженными породами и 2) породами, образовавшимися в результате перерастворения материала первого элемента или путем инъекции извне.

Эта группа пород занимает промежуточное положение между собственно изверженными породами и кристаллическими сланцами осадочного или изверженного происхождения».

Двадцатью годами позже Седергольм снова дает определение мигматиту.

«Автор думает, что для этих гибридных пород нужно употреблять такое название, которое бы реально отражало их внешний вид и происхождение. Они выглядят как смешанные породы и образовались в результате смеси более древних пород с внедрившейся более поздней гранитной магмой. Поэтому более всего к ним подходит название *мигматит*» (II, стр. 136).

Эруптивные компоненты мигматитов «могут принадлежать разным гранитам, иногда двум или даже нескольким» (стр. 136). «При более полной ассимиляции более древних пород в некоторых случаях довольно трудно определить их первоначальный характер, т. е. различить гранитизированные гнейсовидные граниты и очень сильно гранитизированные лептиты» (стр. 136.) По Седергольму мигматиты всегда связаны с гранитами.

Из этих замечаний Седергольма я выбираю для обсуждения несколько вопросов. Первый касается требования, что мигматиты «должны выглядеть как смешанные породы».

В первой части настоящей работы в предварительной форме я уже касался этого вопроса, когда напомнил, что Ниггли также включил эту оговорку в свое определение мигматита. Совершенно также К. Х. Шейман<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> *Tscher. Min. Petr. Mitt.*, 48, 297, 1936.

который занимается номенклатурой мигматитов, считает грубо смешанную текстуру необходимой принадлежностью этих пород. Эта текстура возникает в результате гетерогенного смешения более древних твердых пород с более молодыми расплавами или растворами различного происхождения. Мне кажется, что настойчивое требование грубосмешанной текстуры ведет к значительным трудностям при строгом применении этого термина. Следует вспомнить, что продукты имбиции, пропитывания, наложения и тому подобных процессов очень близки к образованиям, наблюдавшимся во французских гранитных контактах. В большинстве случаев эти продукты вовсе не являются грубой смесью. Далее, Седергольм описал подобные процессы и подобные образования в финских комплексах. Так, в работе 1907 г. «О гранитах и гнейсах» мы находим зарисовки и описания мигматитов, «в которых породы целиком пронизаны сетью прожилков, материал которых является более массивным, чем окружающие части породы, несмотря на то, что резкие контакты между ними отсутствуют» (стр. 97; фиг. 1, табл. IV). То, что боковые породы являются пронизываемыми, показывает гранитизация кварцитов и контактовые явления вокруг, например гранитов рапакиви. Таким образом, магма или ее соки (juices) в состоянии проникать и пропитывать вмещающие породы<sup>1</sup>; граниты Ханко проникли во вмещающие породы настолько «тонко, что никаких границ уже не видно», и, кроме того, они пропитали более древние массы, проникнув в них «в виде масляного пятна (a tache d'huile)<sup>2</sup>. Если «границы не заметны», то мне кажется маловероятным, что можно было увидеть «грубое смешение». Я видел в Финляндии большие массы гомогенных пород, которые Седергольм сам демонстрировал в качестве мигматитов. Каждый, кто работал в областях развития мигматитов, знает, что продукты имбиционного пропитывания или проникновения обычно бывают среднезернистыми и гомогенными. Должны ли мы эти, не вызывающие сомнения, продукты смешения

<sup>1</sup> Migmatites, III, 36, 41, 44, 52.

<sup>2</sup> Migmatites, II, 69.

исключить из понятия мигматита как смешанной породы? Мне кажется, что нет веских оснований для того, чтобы оставить это ограничение. В конце концов, это вопрос о масштабе явления, а кто слишком много думает о масштабах, должен перечитать «Путешествия Гулливера». Поэтому согласимся, что мигматит не обязательно является грубо смешанной породой.

Следующая сторона определения Седергольма, о которой я также говорил в первой части, касается обязательного участия гранитной магмы, которая при мигматизации является одним из родителей (или быть может прародителем) породы: «если даже часть жил образовалась из растворенного более древнего материала, это растворение... имеет место в связи с подъемом гранитной магмы»<sup>1</sup>. Это, как мы уже видели, является точкой зрения Мишель-Леви и Лакруа. Новая магма, которая в результате этого «растворения» сделалась способной к мигматизации, является палингенетической или возрожденной магмой Седергольма, а процесс образования этой палингенетической магмы из твердых пород есть анатексис. Прежде чем идти дальше, я должен сказать, что я никогда не чувствовал необходимости существования обоих седергольмовских терминов — палингенеза и анатексиса. Во многих случаях Седергольм употребляет их равнозначно и мне кажется, что термин палингенез должен быть отброшен, так как его полностью может заменить анатексис. Теперь мы можем посмотреть, что собой представляет процесс анатексиса; здесь, однако, придется столкнуться с некоторыми неожиданными неясностями.

В предварительном исследовании финских мигматитов Седергольм полагает, что в прибрежном районе южной Финляндии «явления переплавления или перерастворения проявлены настолько широко, что можно принять, что вся эта площадь находилась в расплавленном состоянии» (1907, стр. 101). Это широкое плавление или перерастворение произошло благодаря действию магмы, которая, будучи приведена в движение процессами, возникающими в результате охлаждения земли,

<sup>1</sup> Migmatites, II, 136.

прокладывает себе дорогу в верхние горизонты земной коры. С приближением к поверхности растворяющая и метаморфизирующая сила магмы постепенно уменьшается (стр. 102). «Эти процессы регионального перерастворения... или анатексиса... твердых пород», продолжает Седергольм, «не изменяют вещественный состав магмы, взятой в целом, так как эта магма ассимилирует материал, который почти *весь* образовался в результате разрушения магматических пород, и восстанавливает таким образом их первоначальный состав» (стр. 102). Следуя Хеттону, Седергольм видит, что

«процессы разрушения и новообразования твердой части земной коры представляют собой *кругооборот*. Некогда затвердевшая и частично разрушенная гранитная магма при погружении в более глубокие части земной коры снова претерпевает возрождение или... *палингенез*. Региональный метаморфизм возникает в результате более слабого проявления плутонических сил, которые на большей глубине проявляют себя в виде регионального перерастворения или анатексиса» (стр. 102).

Правда, я цитирую только короткое английское резюме длинной шведской статьи и вдобавок статьи предварительной. Тем не менее, я все же нахожу, что очень трудно решить, какую же роль в анатексисе играет магма и если действительно играет, то каково ее поведение.

Разберем, однако, следующее положение Седергольма, высказанное им в 1913 г.<sup>1</sup> В этой общей работе о мигматитах он отмечает, что анатексис обязан своим происхождением более интенсивным процессам, нежели метаморфизм... Анатексис в действительности является ультраметаморфизмом. Он включает в себя все процессы, приводящие к образованию мигматитов, а также к амальгамации или к оживлению уже твердых пород более поздней интродуцировавшей магмой. Это положение заставляет меня предполагать, что и в 1913 г. анатексис и мигматизация не были слишком различными вещами. Та же мысль возникает из рассмотрения мнения Седергольма по поводу эруптивных брекчий, представляющих собой блоки основной породы в гранитном цементе, высказанного им в первой статье о миг-

<sup>1</sup> Über die Entstehung der migmatitischen Gesteine. *Geol. Rund.*, 4, 178, 1913.

матитах (I, стр. 125). Описав результаты тонкого проникновения гранитной магмы в обломки основных пород, Седергольм говорит: «Когда анатексис идет дальше, небулитовые мигматиты часто выглядят как граниты или гранодиориты, содержащие шпильки более основного материала» (стр. 125). Дальше он отмечает: «Когда анатексис идет дальше, гранитизированные основные породы, даже если они были метабазами, часто приобретают гранитную структуру» (стр. 126). Мне кажется из описания этих процессов самим Седергольмом, что совершенно не обязательно образование новой магмы путем переплавления. Так как в применении Седергольмом термина анатексис имеется некоторая неопределенность, мы должны дать ему, если это возможно, точное и ясное определение. Что касается меня, то я, как я уже сказал в первой части, принимаю *анатексис для обозначения процесса образования новой магмы из твердых пород*. Мы уже рассмотрели предположения относительно этого процесса в первой части настоящей работы и теперь можем продолжить наше исследование, обратив особое внимание на фенноскандинавские работы.

Мы можем видеть, что в течение жизни Седергольма его идеи относительно мигматитов претерпели эволюцию, пожалуй, не совсем неожиданную. Временами он находился под впечатлением тех громадных глубин земной коры, на которые, по его мнению, опускались породы финского докембрия. Региональное переплавление в южной Финляндии происходило тогда, когда «целая область... погружалась на такую большую глубину, которая приближалась к бездонному магматическому океану или тектосфере земли»<sup>1</sup>. В этом хеттоновском кругообороте он, как мы видели, допускает возрождение магмы, когда продукты денудации «падают в более глубокие части земной коры» (стр. 102). Горообразующие процессы, метаморфизм и проникновение в поверхностные слои земной коры больших гранитных масс являются только различными фазами одной и той же плутонической деятельности (стр. 109). Однако в 1926 г.

<sup>1</sup> Om Granite och Gneis, 101, 1907.

он особо подчеркнул, что в процессе анатексиса и мигматизации очень большое значение имеют метасоматизм и ультраметасоматизм, вызванные гранитными соками или, как он говорит, ихорами (ichors). Касаясь, например, мигматитов в области Барозундсфиорда (Вагосундфjord), он выставляет нижеследующее положение, которое я рекомендую тщательно разобрать.

«Эти слоистые породы были... тонко перемешаны с гранитом или гранитными соками, которые метасоматически превратили их в гранитоподобные породы»<sup>1</sup>.

«В мигматитах Богаскера (Bogaskar) и Ловгрунда (Lövgrund) нам удалось изучить изменение светлых частей слоистых лептитов, происшедшее благодаря метасоматическим преобразованиям, которые были вызваны внедрением древнего гранита в породы, постепенно приобретающие гранитный характер... процессом, который может быть назван палингенезом» (стр. 27).

«В этих породах нет резкого разграничения между тем, что может быть названо метасоматическим ультраметаморфизмом и инъекцией гранитной магмы» (стр. 28).

«... лептитовые сланцы были ультраметасоматически... изменены до такой стадии, которая приближается к стадии переплавления» (стр. 29).

«... гранитные соки пропитывают некоторые слои и постепенно метасоматически изменяют их в породы более или менее типичного аплитового состава» (стр. 29).

«Соки более молодого гранита проникают в более древние граниты... и затем «ультраметасоматически» превращают их в новый гранит, который на конечных стадиях оказывается в состоянии реагировать с другими породами уже как эруптив» (стр. 50).

Идя дальше, Седергольм говорит, что его представления «развивались в таком направлении, что он склонен приписывать все большее и большее значение гранитным эксудатам или «гранитным сокам» (granitic juices), т. е. тому, что французские геологи называли минерализаторами (les minéralisateurs) — выражением, имеющим, однако, не совсем точно этот же смысл» (стр. 87). Седергольм недоволен словом сок (juice), так как оно относится к растительному миру, и после тщательного обсуждения он решил вместо него употреблять слово ихор. «Ихор» происходит от греческого слова, обозначающего кровь богов, а также сукровицу и гной, и лично я предпочитаю применять более

<sup>1</sup> Migmatites, II, 25.

благозвучное слово «сок», чем, может быть, патологический ихор Седергольма. Гранитные ихоры Седергольма, таким образом, являются эксудатами, «представляя собой переходные образования между водным раствором и весьма разжиженной магмой, и могущими также быть магмой, содержащей много воды в газовом состоянии» (стр. 89). Они не включают в себя газообразного вещества, принимающего участие в типичном пневматолитизе.

Седергольм соглашается с французами, что для метаморфизма необходимы большие количества растворителей. «Эти растворители являются вообще эксудатами, выделяющимися из эруптивных масс, или видимых, или скрытых на большой глубине» (стр. 129). Ихоры активны также и в автотметаморфизме и в процессах продвижения дейтерических изменений. «Иногда, когда уже твердый гранит пропитывается своим собственным ихором, может произойти даже полная его перекристаллизация» (стр. 133—134). Пропитывание боковых пород гранитной магмой и в особенности гранитными соками также подтверждается Седергольмом; «гранитная магма часто выдвигает вперед «масляное пятно» (стр. 134). Это пропитывание может привести к образованию новой магмы; «гранитный ихор в состоянии тонко проникать в более древние породы, придавая им новую «паллингенную» способность к внедрению, даже в тех случаях, когда их химический состав не изменяется. Однако в большинстве случаев при пропитывании гранитной магмой или ее ихором они постепенно меняют свой состав, который все больше и больше приближается к составу нового гранита» (стр. 134—135). Это тонкое проникновение ихоров в соединении с механической инъекцией в более древние породы ведет к возникновению огромного разнообразия мигматитов. Хотя эти процессы могут описываться как ультраметаморфизм, так как они несомненно превосходят по своей интенсивности процессы обычного метаморфизма, они в действительности значительно отличаются от последних, ибо ведут к образованию пород, которые больше не являются кристаллическими сланцами, но в которых, по крайней мере один из компонентов, ведет себя как эруптив» (стр. 135).

Вместо ультраметаморфизма Седергольм «предпочитает термин анатексис, который означает переплавление, хотя в некоторых случаях было бы правильнее сказать перерастворение» (стр. 135). Этот «анатексис гранитных масс земной коры вызывается, главным образом, влиянием эманаций абиссальной магмы» (стр. 135).

На предыдущих страницах я привел целый ряд цитат из работ Седергольма, которые, я надеюсь, дают правильное представление о его воззрениях. Я уже занимался в разное время тщательным и беспристрастным рассмотрением его работ. К несчастью, однако, я никогда не был в состоянии понять, почему он так непреклонно придерживался мнения, что для мигматизации необходима гранитная магма. Я скорее обнаруживаю, и без всякого предубеждения, некоторую склонность к шведской латераль-секреционной теории, несмотря на энергичные дебаты с Холмквистом и другими шведскими геологами по этому вопросу. Основные вехи этой финско-шведской дискуссии я покажу на следующих страницах. Сейчас же мне очень хочется прокомментировать некоторые общие положения работ Седергольма, которые для нас являются интересными в данном случае. Он не только петрогенетически, но и стратиграфически проанализировал всю сложную проблему финского докембрия. Он продемонстрировал там исключительную распространенность явлений, весьма близких тем, которые были описаны французской школой. Он сделал предположение о региональном переплавлении наиболее глубоко погребенных частей земной коры — переплавлении, связанном с гранитной магмой. В более поздних работах он особо подчеркнул большое значение пропитывания при мигматизации и описал результаты процесса, который, по моему мнению, подходит под мое узкое определение гранитизации. На этой стадии своих работ он также подчеркнул важное значение метасоматизма в мигматизации.

Мы ни в коей мере не желаем уменьшить его заслуг, если выскажем предположение, что он в своих более поздних работах находился под влиянием статей В. М. Гольдшмидта об инъекционном метаморфизме округа Ставангер (Stavanger) в Норвегии, вышедших

в 1921 г., в которых метасоматизму отведено преобладающее место.

Рассмотрим соответствующие стороны работ Гольдшмидта. Закончив свои классические исследования контактового метаморфизма в районе Осло, он в 1911 г. продолжал изучать некоторые проблемы регионального метаморфизма в южной Норвегии. Результаты этого исследования были опубликованы между 1912 и 1921 гг. в виде пяти частей его «Геолого-петрографического изучения Южно-Норвежского хребта»<sup>1</sup>. Все это заслуживает глубокого изучения теми, кто занимается метаморфической геологией, но сейчас нас непосредственно касается только пятая часть — «Инъекционный метаморфизм в области Ставангер»<sup>2</sup>. В области Ставангер Гольдшмидт рассматривает один из видов контактового метаморфизма, который накладывается на региональный метаморфизм. Типичными продуктами регионального метаморфизма являются кварцево-мусковито-хлоритовые филлиты, которые, через промежуточные стадии, отмечаемые появлением биотита и граната, переходят в альбитовые порфиробластические сланцы и очковые гнейсы. Эти грубозернистые гнейсы с большими «очками» щелочно-полевого шпата, по мнению Гольдшмидта, образовались в результате «инъекционного метаморфизма» пелитовых пород, во время которого имел место привнос кремнекислоты, натрия и извести. Гольдшмидт сравнивает эти данные с наблюдениями над другими гранитными контактами и в особенности французскими. Однако особый интерес теперь для нас представляет его обсуждение метасоматических процессов, которые имеют место в силикатных породах (стр. 132—137). Гольдшмидт детально разобрал этот вопрос в отдельной работе («О метасоматических процессах в силикатных породах») <sup>3</sup>. Метасоматизм изменяет

<sup>1</sup> V. M. Goldschmidt, Geologisch-Petrographische Studien im Hochgebirge des Südlichen Norwegens. *Videnskapsselskapets Skrifter. I. Mat. naturv. Klasse*, 18, 1912; 19, 1912; 10, 1915; 2, 1916; 10, 1920.

<sup>2</sup> Die Injektionsmetamorphose in Stavanger-Gebiete. *Vidensk. Skr.* 1920, 10, 1921.

<sup>3</sup> *Econom. Geology*, 17, 105, 1922.

состав метаморфических пород благодаря воздействию привносящихся веществ: газов, водных растворов или расплавов. Одна из наиболее важных ветвей этого метасоматизма осуществляется путем переноса щелочей. Во время этого щелочного метасоматизма щелочи могут обмениваться местами, как это происходит при образовании мирмекита, или, при избытке глинозема в первоначальных породах, они могут фиксироваться в виде полевого шпата инъекционных комплексов, как это имеет место в Ставангере, или, наконец, они могут фиксироваться железо-магнезиальными минералами или кварцем (стр. 110). Я привел работу Гольдшмидта для того, чтобы показать ту основу, на которой базировались многие более поздние гипотезы.

Я уже упоминал о тех дебатах, которые происходили между Седергольмом и Холмквистом по поводу происхождения «жил» в «жилковатых» («veined») гнейсах, и остановлюсь теперь на этом более подробно. Мы должны вспомнить позицию Седергольма: жилковатые гнейсы «образовались благодаря инъекции гранитных жил»<sup>1</sup> и «аплитизация более древних пород, которая играет такую важную роль в образовании жилковатых гнейсов, никак не может в данном районе быть объяснена ультраметаморфизмом, независимым от внедрения гранита, поскольку каждая аплитовая или гранитовая жила генетически связана со своим особым гранитом»<sup>2</sup>. Следуя своей «патологической» терминологии, Седергольм называет жилковатые гнейсы *артеритами*, т. е. породами, которые наполнились новой кровью. В артеритах, или артеритовых мигматитах, «сланцеватая порода, разделяется особенно охотно вдоль плоскостей сланцеватости» (стр. 136). Артериты образуются в результате тонких инъекций в ранее существовавшие породы, и Седергольм «поэтому не может разделить мнение Холмквиста, согласно которому многие инъекционные породы... должны рассматриваться как *венины*, т. е. породы, в которых жилы должны быть

<sup>1</sup> I. Sederholm, 95, 1907.

<sup>2</sup> Migmatites, I, 150.

преимущественно эксудатами из окружающих пород» (стр. 137).

Шведская точка зрения проводилась главным образом П. И. Холмквистом<sup>1</sup>. Холмквист придерживается того мнения, что жилы в жилковатых гнейсах не имеют отношения к гранитной интрузии, а являются результатом внутреннего изменения пород в процессе регионального метаморфизма. Он допускает местную инъекцию гранита. Однако жилковатые гнейсы имеют такое широкое распространение, а текстура настолько тонка и правильна, что это исключает возможность их инъекционного происхождения (1921, стр. 612—613). Присутствие интрузивного тела просто усиливает процесс образования прожилков (стр. 615). В подходящих условиях, в зонах высокометаморфизованных пород, возникает, таким образом, «настоящее плавление наиболее легкоплавких пород» (1920, стр. 210), т. е. пегматитовый палингенез, не имеющий отношения к интрузии изверженных пород, и в результате этого *ультраметаморфизма* получают жилковатые гнейсы. Для жилковатых гнейсов Холмквист предлагает термин *венит*, не имеющий генетического значения; существуют латераль-секреционные вениты, образовавшиеся во время ультраметаморфизма и существуют инъекционные вениты, отвечающие артериям Седергольма.

Для поверхностного наблюдателя полемика между Холмквистом и Седергольмом кажется до известной степени академической. Холмквист (1921, стр. 627—628) считает, что в областях, где складчатость и магматическая инъекция происходили в одно и то же время, имеются идеальные условия для образования пегматитовых жил, а именно: высокое давление, высокая температура и обилие минерализаторов. Изменения диагенетического, метасоматического, пневматолитового, палингенетического или магматического характера идут последовательно (1921, стр. 630). Холмквист допускает, что гранитная магма может получиться в результате обра-

---

<sup>1</sup> P. J. Holmquist, Typen und Nomenklatur der Adergesteine, *Geol. Fören. Förh.*, 43, 612, 1921, Om Pegmatitpalingenes och Pygmatitisk Veckning, *ibid.*, 42, 1920, English Summary, 209.

зования венитов, в то время как Седергольм допускает анатексис преимущественно на больших глубинах. Как отмечает сам Седергольм<sup>1</sup>, «принципиальная разница между этими концепциями не очень велика». Он думает, что «гранитные массы, которые приобрели подвижность на очень больших глубинах, внедрялись на своем пути снизу вверх, так же как и их эманации, в твердые породы, в то время как авангард пегматитовых жил мог идти далеко впереди великой армии, в некоторых случаях соединяясь с революционными силами боковых пород. По Холмквисту, в смешанных породах гранитные жилы в большой степени обязаны своим происхождением действию этих «революционных сил», которые действовали одни по своей собственной инициативе и часто имели очень мало прямой связи с внедряющейся магмой». Важно, однако, уяснить, что работа Холмквиста по изучению жилковатых гнейсов имела большое значение для того, что мы теперь называем метаморфической диффузией и метаморфической дифференциацией, а также для идеи селективного переплавления, т. е. всех тех идей, которые впоследствии были развиты более поздним поколением скандинавских геологов, как, например, Эскола (Eskola), Вегманом (Wegmann) и Баклундом (Backlund).

Некоторые участки в юго-западной Финляндии, ставшие знаменитыми благодаря исследованиям Седергольма, были затем вновь изучены К. Вегманом и Е. Х. Кранком (E. H. Cranck) с точки зрения новых тектонических и петрологических идей. Некоторые результаты их работ, как имеющие отношение к гранитизации в широком смысле этого слова, должны быть здесь изложены. Они взяты главным образом из работы 1931 г.<sup>2</sup> Вегман приходит к заключению, что большая часть гранита Ханко была не расплавленной силикатной массой в обычном смысле этого слова, а массой, пропитанной гранитными растворами, которые пришли снизу. Когда эта пропитанная масса двигалась и встречалась с достаточным

<sup>1</sup> Migmatites, II, 137.

<sup>2</sup> С. Е. Wegmann and E. H. Cranck, Beiträge zur Kenntnis der Svecofenniden in Finland I, II, *Bull. Com. Géol. Finlande*, 89, 1931.

сопротивлением стенок, она представлялась нам в виде *интрузии*.

Движения дают интрузию, отсутствие движений ведет к развитию гранитизации. Пегматитовые дайки являются частью гранитизирующих растворов, которые кристаллизуются в трещинах и открытых пространствах, возникающих в пропитанной массе (1931, стр. 58—59). Вокруг «фильтрующих колонн» находится ореол, различные части которого обогащены различными веществами. Во внутренних частях наблюдается обогащение Si и K, соответствующих обогащению кварцем и полевым шпатом, во внешних — обогащение Mg в богатой кордиеритом зоне. Еще дальше находится эпидотизированная зона унакитов<sup>1</sup> (стр. 62). Если материал был привнесен в одно место, значит он должен был быть вынесен из другого; вся цепь химических реакций должна была приходиться в движение. Растворы устремляются в направлении градиента химической концентрации, но им мешает малая проницаемость пород, падение температуры и образование в породах нерастворимых соединений, способных абсорбировать те или иные вещества (стр. 63). Вегман связывает эти события с орогеническими движениями, которые происходят параллельно с атомными перегруппировками (стр. 64).

Вегман является тектонистом, вышедшим из школы Аргана (Argand). Кинетические схемы последнего были применены к петрологическим процессам Кранком, который считает, что в случае гранитов Ханко растворы проникали по плоскостям движений, а затем распространялись в сторону от них (стр. 92—93). В зоне гранитизации типичными минералами являются кордиерит и антофиллит, далее находятся более низкотемпературные минералы, такие, как андалузит, кианит и гранат, а при еще более низких температурах появляются ставролит и, наконец, турмалин. Весь процесс представляет собой обмен минералов, богатых Mg, Fe(Ca) на минералы, богатые K, Al, Si; это магниезиальный метасоматизм, связанный с формированием калиевого гранита

<sup>1</sup> Унакиты — эпидоттортоклазовые пегматиты, по Бреггеру. (Прим. ред.)

(стр. 94). Кранк приходит к заключению, что мигматизация не является результатом плавления под действием гранитной интрузии, а возникает при метасоматизме, вызываемом пегматитовыми растворами, представляющими собой ихоры Седергольма. Гранитизация является скорее метасоматизмом, нежели мигматитовой интрузией (стр. 96).

В более поздних работах Кранк подтвердил вывод, что гранитизация является не инъекцией гранитной магмы, а инъекцией газов или водных растворов, которые приводят к полному метасоматизму. Благодаря этому перенос материала идет без заметных механических изменений реагирующих пород<sup>1</sup>. Позиция Седергольма, в особенности в отношении необходимости присутствия гранитной магмы для мигматизации, начала колебаться в результате исследований в его собственной «цитадели».

После своих детальных исследований в Финляндии и успешной работы в Гренландии, о которой я скажу ниже, Вегман перешел к обсуждению общей проблемы мигматитов, посвятив ей ряд своих работ<sup>2</sup>. Согласно Вегману, залегание мигматитов может быть двоякое. Одни находятся в краевой зоне гранитов, которые интродировали в виде магмы, а другие в зоне превращения в гранит боковых пород. Так как в граните сохраняются все типы седиментационных структур и тектонических текстур, то, следовательно, мигматизация боковых пород проходила волной, оставляя за собой гранитную и гнейсовую зону в качестве свидетеля своего прохождения<sup>3</sup>. Продвижение этого фронта мигматизации вместе с несовпадающим с ним продвижением фронта охлаждения ведет к бесчисленному разнообразию проявлений мигматизации (стр. 315). Вегман определяет и обсуждает четыре термина, постоянно употребляющихся при изучении мигматитов.

<sup>1</sup> Über Intrusion und Tektonik im Küstengebiet zwischen Helsingfors und Porkola, *C. R. Géol. Soc. Finl*, 10, 85, 1937.

<sup>2</sup> Zur Deutung der Migmatite, *Geol. Rund.*, 26, 305, 1935. Über einige Fragen der Tiefentektonik, *ibid.*, 449. Geologische Merkmale der Unterkruste, *ibid.*, 27, 43, 1936.

<sup>3</sup> Zur Deutung der Migmatite, *Geol. Rund.*, 27, 85, 1935.

Мы можем рассмотреть их несколько подробнее.

1. *Интрузия* — вхождение или насильственное внедрение магмы (Schmelzflüss).

2. *Инъекция*. Впрыскивание растворов пневматолитового или гидротермального характера. Употребление для мигматита термина «инъекционный гнейс» не обосновано; инъекция должна быть доказана.

3. *Расплавление* (Aufschmelzung). Боковые породы становятся бесструктурным расплавом, который кристаллизуется заново. Этот процесс не имеет большого значения в мигматизации (стр. 318).

4. *Миграция материала* (Stoffwanderung), называемая часто метасоматизмом, проникновением или имбибицией. Мигрирующий материал передвигается через породу в виде атомов и молекул и реагирует с материалом породы, в которой он проходит. Этот процесс обычно называют метасоматизмом (стр. 319). Процесс миграции подобен механизму масляного пятна, так как никаких подводящих каналов не наблюдается (стр. 321). Образуются псевдоморфозы по боковым породам с сохранением их геометрии; таким образом, увеличения объема не происходит и материал не только привносится, но также и выносится. Если текстуры и структуры вмещающих пород сохраняются, то не может быть никакого вопроса о расплавлении (стр. 322). В самом деле, термины «плавление» и «продукты плавления» являются по отношению к мигматитам самыми неподходящими и, наоборот, «растворы» и «продукты действия растворов» — наиболее предпочтительными (стр. 323). Вегман подчеркивает значение интергранулярной пленки при движении вещества и сопутствующих реакциях. Благодаря накоплению (integration) большого числа градиентов концентрации вокруг отдельных зерен образуется своего рода фронт, в котором и происходит большинство изменений. Когда материал изменяющейся породы израсходуется, этот фронт, если этому благоприятствует температура, продвигается дальше. Таким образом, граница гранитизации определяется взаимоотношениями между притоком вещества и охлаждением. Если фронт находится в стационарном состоянии, тогда могут образоваться резкие контакты, которые, однако, не

являются интрузивными, ибо, как известно, интрузии могут иметь расплывчатые контакты. Фронт может характеризоваться различными минералами, как, например, натриевыми в Ставангере, калиевыми в Ханко, магниевыми в Ориярви (Orijarvi) (стр. 326—327). Продвижение одного фронта влечет за собой продвижение другого; например, образование фронта калия или натрия, о чем свидетельствует фельдшпатизация, может способствовать выдвиганию вперед излишней магнезии с образованием кордиеритового фронта (стр. 327). На движение мигматитового фронта оказывает большое влияние температурный градиент. Повышение температуры увеличивает подвижность интергранулярной пленки, а большая подвижность материала приводит к притоку большего количества тепла; многие реакции идут параллельно с увеличением температуры, и все это в конце концов складывается вместе.

Далее Вегман разбирает перемещение материала в субстрате и мигматитовой зоне. Он говорит, что следует провести различие между тем, что делается в немигматитовой верхней структурной зоне (Oberbau) и в мигматитовой нижней структурной зоне (Unterbau) (стр. 332). Две зоны дисгармонично смяты и мигматитовая зона заполняет своды в верхней зоне, как это видно, например, в Гренландии. Между двумя зонами находится промежуточная зона, которая является областью так называемого регионального метаморфизма. Она может быть узкой, как в Пеллинге (Pellinge), в Финляндии, или широкой, как в каледонидах Скандинавии. Во время выжимания вверх мигматитового фронта волна «регионального метаморфизма» промежуточной зоны также продвигается вперед. В складчатых зонах с большим поперечным сжатием верхняя структурная зона является областью развития надвигов, промежуточная зона — областью крупных покровов и нижняя структурная зона — крутых складок течения (flowage folds). Далее, так как верхняя часть нижней зоны и промежуточная зона когда-то были частями верхней зоны, то можно ожидать, что в них окажутся реликты структурных черт верхней зоны (стр. 334). Различаются два типа складок верхней структурной зоны: складки, обра-

зовавшиеся благодаря сжатию сегмента, и складки, образовавшиеся благодаря скоплению в сводах и поднятию нижней зоны. В сжатых сводах нижней структурной зоны перекристаллизация особенно интенсивна; во многих случаях складчатые гнейсы прорываются ясно различаемыми гранитными штоками. Однако когда эти штоки начинают изучать более детально, то многие из них оказываются перекристаллизованными сильноскладчатými мигматитами (стр. 334). В результате сильной складчатости в верхней структурной зоне образуются выступы нижней зоны, а интенсивное смещение и перекристаллизация превращают их в гранитные интрузии, мигматитовое происхождение которых позже установить уже трудно. Эти выступы, имеющие природу нижней структурной зоны, могут существовать в различных фазах. Когда они настигаются мигматитовым фронтом, они являются «ранними гранитами», или «авангардными гранитами»; когда они развиваются при максимуме мигматизации и внедряются в промежуточную зону, они являются «главными гранитами»; когда они образуются во время отступления фронта, они интродуцируют уже затвердевшие части мигматитовой зоны и являются «поздними, или арьергардными гранитами» (стр. 335).

Вегман считает, что мигматитовый фронт вторгается снизу к основанию верхней структурной зоны; тепло и приток материала создают условия, свойственные нижней зоне, между тем как геосинклинальные осадки становятся материалом для новых мигматитовых циклов (стр. 336). Когда температура и давление достигают определенных пределов, породы кристаллических ядер становятся способными к движению, их контакты начинают смещаться вследствие переноса материала интергранулярной пленкой, и на старом основании возникают новые мигматиты (стр. 338). Мигматитовый фронт, продвигаясь выше в осадочную толщу, сечет стратиграфические границы и может развиваться в виде сводоподобных форм. Промежуточные зоны, являющиеся зонами регионального метаморфизма, лежат, таким образом, косо по отношению к плоскостям наслоения (стр. 339—340).

Как уже отмечено, Вегман считает, что гранитизация имеет передовой оптимум и отстающие стадии. Повсюду мигматиты вытесняются вперед во внешние зоны и затвердевают там в виде ранних, главных или поздних гранитов. Соотношения этих гранитов с вмещающими породами различны и зависят от зоны, в которую они внедряются. Исследования во многих мигматитовых областях показывают, что многие граниты и гранодиориты имеют смешанное происхождение. Они обнаруживают реликтовые текстуры, которые не дают возможности считать их дериватами базальтовой магмы (стр. 342—343). Вегман (стр. 343—344) придерживается первоначальной концепции о том, что мигматиты представляют собой магмы; об этом я довольно подробно говорил в первой части и сейчас только напомню, что я считаю различие между магмой и мигмой весьма важным для нашего исследования.

Последняя сторона общих рассуждений Вегмана, которую я хочу здесь затронуть, касается источников внедряющегося материала. Обычно считают, что этими источниками являются находящиеся здесь же интрузии. Общеизвестно, что эти интрузии имеют очень широкие контактные ореолы в промежуточной зоне, т. е. в зоне регионального метаморфизма, но все же они не достигают величины мигматитовых областей. Более того, многие из этих интрузий имеют сами смешанное происхождение. Надо признать, что во многих районах источник внедряющихся материалов до сих пор неизвестен. Они должны приходить с очень больших глубин, где они могут находиться в больших количествах. Если они возникают из глубинных расплавов, можно допустить две возможности: или они могут концентрироваться в результате кристаллизационной дифференциации, или они могут быть выжаты из глубин (стр. 345—346).

Многие взгляды Вегмана иллюстрируются его работами по Гренландии<sup>1</sup> и здесь нет необходимости рассматривать их дальше во всех деталях. Я остановился

---

<sup>1</sup> Caledonian Orogeny in Christian X's Land, *Medd. om Grönl.*, 103, No 3, 1935. Geological Investigations in Southern Greenland, *Medd. om Grönl.*, 113, 2, 1938.

на них более или менее подробно, потому что подозреваю, что знакомство английских геологов с финской школой часто останавливается на Седергольме. Мы будем рассматривать дальнейшее развитие этой проблемы в Фенноскандии в следующей главе, теперь же я хочу кратко рассмотреть те возражения, которые были сделаны Вегману Ниггли<sup>1</sup>. Ниггли утверждает, что Вегман расширил мигматитовую концепцию Седергольма, допустив существование многих процессов гранитизации, в которых магма не играет никакой роли (стр. 27—28). Далее, молекулярный перенос Вегмана ведет к образованию однородных пород, в которых субстанции, ранее существовавшие и принесенные, не отделимы друг от друга, и, таким образом, эти породы не согласуются с правилом Седергольма, что мигматиты «выглядят как смешанные породы». Интергранулярная пленка Вегмана (которую Ниггли считает своим открытием, ссылаясь на свой труд «Метаморфизм горных пород»), в действительности играет при метаморфизме очень малую роль, и если полностью следовать Вегману, то нужно было бы практически все метаморфические породы считать мигматитами (стр. 29—30). Как говорит Ниггли, Вегман никогда ясно не знает, имеет ли он дело с гранитами, затвердевшими из магмы, или с гранитами, образовавшимися благодаря перекристаллизации боковых пород, так же как и не знает, сколько растворенных фаз присутствует в каждый данный момент и сколько их требуется для активизации и мобилизации материала. При процессе обычного метаморфизма, возражает Ниггли, неоднородность может возникать благодаря пластичности одних частей породы и жесткости других, так что в результате может образоваться «мигматит», как это и имеет место в гранито-гнейсах Пеннид (Pennids) (стр. 35—36). Это заставляет Ниггли дать определение термина мигматит, которое я и привожу:

«Термин «мигматит» должен применяться к породам и участкам пород, которые обнаруживают грубую изменчивость магматических и метаморфических структурных элементов, возникли в зоне переходной от твердого к магматическому состоянию и претерпели метамор-

---

<sup>1</sup> Статья Ниггли в настоящем сборнике,

физм, во время которого, без какого-либо увеличения объема, значительная часть породы достигала флюидного или расплавленного состояния. Ассоциация мигматитов с гранитной магмой не обязательна ни для определения мигматита, ни для определения первоисточника и истории его жидкой фазы; смешанные породы, подобные венитам Холмквиста, могут, таким образом, подойти под определение мигматита. Нужно решительно подчеркнуть, что могут образовываться породы сравнительно сходного облика, которые не могут быть названы мигматитами, так как они возникают не в пограничной области жидкость — твердая фаза, а в недрах земли, взятой в целом» (стр. 36—37).

Ниггли протестует, и, по-моему, правильно, против того, как Вегман обращается с магмой, и считает, что последний неправильно употребляет термин магма, тогда когда следовало бы говорить мигма (стр. 39—40). Наконец, Ниггли снова формулирует свою позицию магматиста и эта формулировка заслуживает быть приведенной здесь в моем вольном переводе.

«Суммируя, мы можем смело сказать, что граниты и гранодиориты с их обычными химическими, минералогическими, текстурными и структурными особенностями имеют характер типичных магматических пород, а их трактовка как нормальных метаморфических пород, образовавшихся, например, путем метасоматического изменения осадочных пород, представляется невероятной для всех тех петрографов, которые изучали в поле и лаборатории достаточно большое количество изверженных и метаморфических пород. Новая идея, заключающаяся в том, что гранит является метаморфической породой, не базируется на достаточно основательных исследованиях. Настоящие мигматиты занимают по отношению к гранитам краевое положение, что охотно признают Седергольм, Грубенман, Ниггли, Холмквист, Барт и Шейман. Так называемые гранитизированные метаморфические породы должны быть отделены от гранитов и гранодиоритов».

Я умышленно выделил курсивом часть приведенного выше утверждения Ниггли. И Ниггли и Вегман швейцарцы; и может быть они порадают нас дальнейшими спорами.

Другой представитель Фенноскандии, Баклунд (Helge Backlund), писавший приблизительно в то же время, что и Вегман, выдвинул до некоторой степени сходные идеи, которые он потом развил дальше. Согласно Баклунду<sup>1</sup>, кристаллические породы, включая плутонические и метаморфические, знаменуют определенные стадии эволюции геосинклиналей — факт, не всегда распознаваемый, так

<sup>1</sup> H. Backlund, *Der Magmaaufstieg in Faltengebirgen*, C. R. Soc. Géol. Finlande, 9; *Bull. Com. Géol. Finl.*, 115, 293—347, 1936.

как, во-первых, кристаллические породы не имеют в Альпах большого развития и, во-вторых, кристаллические породы рассматриваются им как образовавшиеся на больших глубинах. Баклунд думает, что эта относительная глубина должна быть, однако, небольшой в сравнении с глубиной складкообразования и общей мощностью осадков геосинклинали (стр. 293—294). Седергольм, как мы уже видели, считал, что, чем древнее горный пояс, тем глубже в него проникла эрозия. Баклунд указывает, что принцип актуализма приложим к древнейшим складчатым зонам и что складчатые горы всех возрастов могут быть сравниваемы между собой. Ряд стадий ультраметаморфизма или ряд увеличивающейся подвижности венит — очковый гнейс — артерит — мигматит — палингенит — диапирит получается в результате увеличения активности щелочно-силикатных растворов (ихоров), а также вследствие повышения температуры. Он считает, что мы можем узнать типичные черты древних складчатых цепей, изучая складчатые зоны более молодого возраста. Происходящие изменения являются результатом поднятия мигматитового фронта (стр. 294—296). В древних складчатых зонах наблюдаются очень неправильные структуры, но следует помнить, что мы не можем их изучать на большом протяжении по вертикали; в то же время в более молодых складчатых зонах не наблюдается выходов больших площадей развития кристаллических пород (стр. 302).

Баклунд соглашается с Вегманом, что в переходной зоне, или «зоне регионального метаморфизма» Вегмана можно распознать обычные типы метаморфических зон. Однако в мигматитовом фронте эти зоны теряются, различие между «пара-» и «орто-» породами пропадает, и граница между ультраметаморфическими и плутоническими породами постепенно исчезает. С продвижением мигматитового фронта различные породы реагируют по-разному. Мигматизация пелитовых осадков хорошо известна. Для изменения химического состава глины до гранита необходим только небольшой привнос натрия и кремнекислоты. Поэтому глинистые, широко распространенные гомогенные породы претерпевают мигматизацию и гранитизацию в широких масштабах. Однако кварциты и

известняки имеют в геосинклинальной толще тоже широкое распространение, но в мигматитовых областях встречаются редко. Что же происходит с этими мономинеральными осадками (стр. 309—311)? После детального рассмотрения (стр. 311—340) поведения кварцитов и известняков в мигматитовых областях Фенноскандии и Гренландии, Баклунд приходит к заключению, что они преобразованы в граниты и в гранодиориты в результате особого рода процесса диффузии, в котором главную роль играют K, Na, Al, Si (стр. 342—343). Мигматиты никогда не представляли собой гомогенного расплава, а являются смесями значительно преобладающей твердой фазы с небольшим количеством жидкости или, употребляя термин Эскола, — поровой магмы (стр. 321). То, что мы называем «подъемом магмы», является тем же самым, что и подъем мигматитового фронта. Элементы с малым атомным радиусом, как, например, Al или Si, образуют острие атаки, щелочи и в особенности K следуют позже. В соответствии с этим «ранние граниты» бедны щелочами, а «поздние граниты» богаты калием. Это «поднятие магмы» и есть гранитизация. При этом объемные изменения у различных типов осадочных пород возрастают от пелитовых осадков к кварцитам и далее к известнякам. Именно поэтому первоначально-пелитовые породы при мигматизации остаются почти полностью в своем первоначальном положении в виде парагнейсов, между тем как производные кварцитов и известняков превращаются в ортогнейсы, перемещаются в более высокие части складчатых гор и на еще более высоких уровнях внедряются как настоящие магматические породы (стр. 343).

Таким образом, для Баклунда все так называемые магматические породы (кроме первичных базальтов и их непосредственных дифференциатов) образуются благодаря гранитизации геосинклинальных осадков. Эти продукты могут возникать *in situ* и затем делаться плутонитами или же могут приходить снизу, давая диапириты, прорезающие первичный покров<sup>1</sup>. Как можно было ожидать, эти взгляды Баклунда вызвали и до сих пор вызывают

<sup>1</sup> Die Umgrenzung der Svekofenniden, *Bull. Geol. Inst. Upsala*, 27, 239, 1937.

большую критику со стороны других скандинавских исследователей. Его главная полемика с Эккерманом изложена в следующей главе, однако я сначала хочу сослаться на его общее изложение<sup>1</sup> теории гранитизации, которое он привел в ответе своим критикам и в частности Н. Х. Магнуссону (N. H. Magnusson)<sup>2</sup>. Он считал, что гранитизация включает в себя такие процессы, как мигматизация (стр. 179) и анатексис (стр. 181), а теперь полагает, что эти процессы привели к образованию древних финляндских гранитов, хотя первоначально Седергольм указывал на явления гранитизации только в ореоле более молодых докембрийских гранитов этой области. Среди других явлений Баклунд описывает в этих гранитах реликты седиментационных и складчатых текстур, региональную ориентировку серий ксенолитов и их взаимоотношения с дайковыми интрузиями. Справедливо, говорит Баклунд, что эти более молодые граниты, как, например, граниты Ханко, сопровождаются развитием огромного количества пегматитов (и таким образом становится понятной концепция Седергольма относительно ихоров или гранитных соков), между тем как более древние граниты лишены пегматитов. Это объяснимо, если гранитизирующий материал, или эманации, хотя бы и имевшие один и тот же состав, встречали различные типы боковых пород. В случае более древних гранитов боковые породы были бедны щелочами и, таким образом, полностью использовали проникавшие в них богатые щелочами флюиды. Когда же образовывались более молодые граниты, боковые породы были уже фельдшпатизированы, так что ихоры находились в избытке и проявились в виде пегматитов. По мнению Баклунда, ихоры, однако, не могут отождествляться с пегматитами (стр. 181—182).

Обращаясь к огромным массам гранитов Скандинавии, показанным на картах в виде сплошной площади одного цвета, Баклунд замечает (стр. 171—177), что эти

<sup>1</sup> Zur Granitisationstheorie. *Geol. Fören. Förhandl.*, 60, 177—200, 1938.

<sup>2</sup> N. H. Magnusson, Die Granitisationstheorie und deren Anwendung für Svionische Granite und Gneise Mittelschwedens. *Geol. Fören. Förhandl.*, 59, 525—548, 1937.

массы «гранита» в действительности очень неоднородны, что зависит от неоднородности осадков, которые были гранитизированы. Он справедливо настаивает на том, что при интерпретации более древнего докембрия весьма важным является проблема пространства. Породы обычно смяты в складки и сильно сжаты, и в такой среде гранит мог занять свое место только путем замещения. Но «удовлетворительно разрешить вопрос о пространстве может только гранитизация» (стр. 187—189).

Как мы уже видели, согласно Баклунду, гранитизация *in situ* (т. е. гранитизация в моем смысле) ведет к увеличению общего количества материала на данном участке. В результате происходит *мобилизация* (приобретение подвижности) или *реоморфизм* продуктов гранитизации. Реоморфизм по Баклунду — это совокупность процессов термального, частичного или полного расплавления ранее существовавших пород вследствие добавки большего или меньшего количества нового материала, поступившего диффузионным путем. Эта мобилизация ведет к течению, дифференциальному движению, складкам течения, проникновению и внедрению в направлении наименьшего сопротивления (стр. 190). Гранитизация контролируется способностью боковых пород допускать диффузию как в отношении количества, так и качества материала. Диффузия увеличивается с повышением температуры, но зависит также от структурных свойств (как, например, сланцеватости) и от состава осадочных пород. Гранитизация может стать, таким образом, кульминационной точкой метасоматизма и найти свое выражение в реоморфизме, ведущем к возникновению резких контактов (стр. 191—192). Баклунд предпочитает употреблять нейтральный термин *эманация* вместо *ихора* и *гранитного сока*, которые означают более или менее прямые остатки от кристаллизации гранитной магмы, поскольку во многих случаях ясно, что причиной гранитизации является материал, который не имеет характера этих остаточных образований (стр. 195—196). В заключение он подчеркивает селективную природу действия эманаций (стр. 196).

На предшествующих страницах мы видели, как французская школа принесла свои плоды в работах Мишель-Леви и Лакруа. Теперь мы увидели, как семена, зало-

женные в трудах фенноскандинавских геологов—Седергольма, Холмквиста и других, — нашли расцвет в работах Вегмана, Кранка и Баклунда, хотя очень может быть, что многие из более поздних цветов показались бы их садовникам экзотичными, а некоторые даже уродливыми. Окинем широким взглядом эти позднейшие фенноскандинавские работы, так как они, несомненно, окажут свое влияние на дальнейшее развитие теории гранитизации. Требование Седергольма о необходимости для мигматизации, приходящей снизу изверженной гранитной магмы, в значительной мере сейчас уже оставлено. Гранитизация в том смысле, в котором я здесь употребляю этот термин, сделалась наиболее важной стороной мигматизации. Она происходит вследствие метасоматической активности эманаций неясного происхождения, которые диффундируют вверх, в более высокие горизонты земной коры. Их работе помогает интергранулярная пленка, поровая жидкость или поровая магма, и они в состоянии преобразовать огромные массы осадков в гранитные и мигматитовые породы. В некоторых орогенных условиях породы становятся способными к мобилизации, к движению и к интрузии. Они могут таким образом подниматься в более высокие горизонты земной коры и терять соприкосновение со своим первоисточником. Процесс гранитизации и мигматизации продвигается волнами и различные «фронты» движутся сквозь породы с различными скоростями и приводят к различным результатам. Если что-либо приносится, то что-то должно выноситься. Движения мигматитового фронта с возникновением гранитных пород и региональным метаморфизмом больших масс пород сопоставляются с тектоническими событиями в значительных участках земной коры.

Последние результаты работ фенноскандинавской школы, верные или неверные, являются весьма интересными. Ими нельзя пренебрегать. Если их не принимать, то возражения должны быть очень обоснованными.

Теперь я хочу рассмотреть еще один вопрос, который касается Фенноскандии, но так как он имеет большой интерес, он заслуживает того, чтобы посвятить ему особую главу.

## РАПАКИВИ

В разборе фенноскандинавских работ, данном на предшествующих страницах, я неоднократно упоминал о существовании глубоких разногласий у финских и шведских геологов по поводу происхождения наиболее типичной фенноскандинавской породы — рапакиви. Я хочу сейчас дать вам некоторое представление об этой дискуссии, поскольку ее главный вопрос заключается в том, является ли эта знаменитая порода гранитом в обычном смысле слова или же ее следует считать продуктом гранитизации. Это также послужит предварительной подготовкой для последующего рассмотрения вопроса о фельдшпатизации.

Граниты рапакиви (*рапакиви* по-фински — рыхлый, гнилой камень) слагают в южной Финляндии очень крупные массивы изометрических очертаний. Один из них находится на восточном берегу Ладожского озера, второй — в районе Выборга, к западу от этого озера, и третий — в районе Пори (Pori), на восточном берегу Ботнического залива; Аландские острова также сложены преимущественно из рапакиви. Целый ряд районов их широкого развития можно видеть на западном берегу Ботнического залива и в других районах Швеции и Норвегии.

Собственно гранит рапакиви характеризуется обилием крупных овоидов калиевого полевого шпата, достигающих до 4 см в поперечнике, заключенных в массе из кварца, калиевого полевого шпата, плагиоклаза, темной слюды и иногда роговой обманки. Овоиды калиевого шпата часто окружены небольшими каймами олигоклаза и это бросающееся в глаза явление всегда нужно иметь в виду при изучении этой породы. Однако следует упомянуть, что многие гранитные породы, ассоциирующие с собственно рапакиви, не обнаруживают этих зональных овоидов. Хотя Седергольм<sup>1</sup> и считает, что все ра-

---

<sup>1</sup> Sederholm, On the Geology of Fennoscandia with Special Reference to the Pre-Cambrian, *Bull. Com. Géol. Finlande*, 98, 24, 1932.

пакиви Фенноскандии имеют один и тот же возраст и одинаковые свойства, однако существует другое мнение, согласно которому гранитные породы со структурой рапакиви как в Фенноскандии, так и в других районах могут быть различного возраста. Граниты рапакиви Фенноскандии залегают обычно в ассоциации с иотнийскими песчаниками или с песчаниками другого возраста. Баклунд<sup>1</sup> говорит: «В Фенноскандии сделалось правилом при встрече более или менее крупных площадей развития иотнийских песчаников искать по соседству с ними рапакиви или их эффузивные эквиваленты».

Конечно, для большинства геологов рапакиви являются изверженными породами, застывшими из магмы. Некоторые петрографы, как, например, А. Джохансен, допускают, что они представляют собой «аномальные граниты», и по вопросам их аномальностей и, в частности, своеобразия их полевых шпатов имела место довольно большая дискуссия. Некоторые читатели настоящей работы, которым известна статья Седергольма о мигматитах, найдут там описание рапакиви района Пеллинге (Pellinge), которое иллюстрировано замечательными рисунками<sup>2</sup>. Так как мне посчастливилось видеть эти рапакиви, я хочу отметить некоторые стороны описания Седергольма.

Контакт гранита, обладающего типичными овоидами, хорошо обнажен на небольшом острове, находящемся юго-западнее Букхольма (Buckholm), в Перна (Perna). Он описан и детально зарисован Седергольмом. Для нас интересным является то, что овоиды присутствуют также и в боковых породах, метаандезитах, на небольшом расстоянии от гранитов. Это не единичный факт, так как Седергольмом<sup>3</sup> и другими исследователями описан целый ряд других примеров подобных явлений. Согласно Седергольму (стр. 78) это явление доказывает, что «сланцеватая порода была проникнута гранитной магмой». Он еще раз указывает (стр. 88), что «ни один гео-

---

<sup>1</sup> H. Backlund, The Problems of the Rapakivi Granites, *Journ. Geol.*, vol. 46, 347, 1938.

<sup>2</sup> Migmatites, I, 75—95.

<sup>3</sup> Там же, фиг. 28, 39, 40.

лог, посетив это место, не может не убедиться в том, что гранитная магма в состоянии тесно проникать в окружающие породы».

Прежде чем комментировать эти утверждения, следует более тщательно взглянуть в зональные овоиды полевого шпата, которые придают настоящим рапакиви их «аномальный» характер. В самом деле, эти овоиды весьма замечательны. Некоторые из них не имеют каймы и состоят из микроклин-пертита, часто с широкой зоной, содержащей идиоморфный кварц. Зональные овоиды обнаруживают сложно построенные кольца олигоклаза, который аллотриоморфен по отношению к находящемуся внутри калиевому полевоому шпату и идиоморфен относительно окружающей овоид массы. Иногда самая середина этих зональных овоидов состоит из агрегата минералов основной массы, который сначала окружен крупным зерном калиевого полевого шпата и только потом плагиоклазовой оболочкой. Овоиды калиевого полевого шпата могут содержать концентрические кольца включений, состоящих из всех минералов основной массы. Часто с овоидами ассоциируют различного рода кварцево-полевошпатовые прорастания. Даже из этого краткого описания ясно, насколько трудно объяснить образование этих зональных овоидов процессами магматической кристаллизации.

Следует указать на те предположения, которые были сделаны магматистами в отношении интерпретации этих овоидов. Полное рассмотрение этой проблемы было сделано Седергольмом<sup>1</sup>. Мы можем бегло ознакомиться с этими разнообразными предположениями, имея при этом все время в виду, что в боковых породах присутствуют такие же овоиды, как и в рапакиви. И. Холмквист<sup>2</sup> думает, что форма овоидов является результатом образования магматических капель, вокруг которых происходил рост кристаллов полевого шпата, однако при этом концентрическая (shelled) структура рапакиви

---

<sup>1</sup> I. Sederholm, On Orbicular Granites, *Bull. Com. Géol. Finl.*, 83, 83—96, 1928.

<sup>2</sup> P. J. Holmquist, Rapakivistruktur och granitstruktur, *Geol. Fören. Förhandl.*, 23, 150—161, 1901.

остаётся необъяснённой. Согласно Б. Попову<sup>1</sup> концентрическая структура обязана своим происхождением кристаллизации путем обрастания, когда зернышко ортоклаза, погружаясь, попадает в новую обстановку; повторение погружения и обрастания ведёт к образованию сложных овоидов. Фогт считает, что овоиды представляют собой эвтектические смеси ортоклаза и олигоклаза, а Харкер<sup>2</sup> видит в них замечательный пример перенасыщения магмы поочередно ортоклазом и олигоклазом. Вааль (Wahl) предполагает, что кристаллизация рапакиви происходила в два приема: ранее выделившиеся кристаллы ортоклаза были более или менее полностью переплавлены в капли в результате уменьшения давления газа. Возможно, что я недостаточно компетентен, чтобы судить об объяснении Вааля, но я должен во всяком случае согласиться с Седергольмом (стр. 91), что оно и «геологически, и геофизически очень запутано». Сам Седергольм прибегает к представлению о высокой вязкости магмы в результате присутствия большого количества олигоклазовой субстанции.

Вышеприведенные гипотезы относятся к фенноскандинавским рапакиви. Однако специфические для рапакиви полевые шпаты встречаются и во многих других гранитах, в частности в гранитах Трегастеля (Tregastel), Кот дю Нор (Côte du Nord), описанных Томасом и Кэмпбеллом Смитом<sup>3</sup>. Эти авторы утверждают, что «не может быть никакого сомнения, что причина образования структуры рапакиви заключается в базификации жидкой фазы гранитной магмы, существовавшей между уже сформировавшимися порфирированными кристаллами микроклина. Количество калия было в известной мере уменьшено в процессе потенциального образования биотита и таким образом при последующей кристаллизации шло образование щелочного плагиоклаза

<sup>1</sup> Б. А. Попов. О южнорусском рапакиви. *Труды Спб. Общ. Естествоисп.*, 31, 77, 1903.

<sup>2</sup> А. Harker, *The Natural History of Igneous Rocks*, 267—268, 1909.

<sup>3</sup> Thomas and Campbell Smith, *Xenoliths of Igneous Origin in the Tregastel-Ploumanac'h Granite, Côtes du Nord, France*, *Quart. Journ. Geol. Soc.*, 88, 291, 1932.

вокруг ядер микроклина». А. К. Уэлс и С. У. Вулдридж<sup>1</sup> придерживаются того же мнения и указывают, что концентрические полевые шпаты Джерсея «отражают увеличение основности магмы в результате усиления контаминации».

Баклунд (стр. 367) отмечает, что «ни одно из старых объяснений, основанных на обычных «магматических» концепциях, не может удовлетворительно объяснить всю ту сложность и запутанность, которые обнаруживаются при детальном изучении овоидов». Возможно, конечно, существование таких сложных проблем, связанных с магматической кристаллизацией, которые еще не могут быть объяснены магматистами, хотя, присутствуя на их совещаниях, я вынес впечатление, что таких вопросов не так уж много. Мы можем, конечно, предположить, что сложность структуры рапакиви, хотя и необъяснимая, обусловлена характером магматических явлений. Если это так, то структура является свидетелем различных событий, происходивших при остывании расплава, которые определялись сложными физико-химическими факторами. Теперь я хочу еще раз напомнить, что совершенно такие же овоиды, как и рапакиви, в изолированном виде встречаются среди боковых пород и что это признает каждый. Нужно ли думать, что сложные физико-химические факторы действовали и в боковых породах точно таким же образом, как и в затвердевающей магме. Мы можем тройко реагировать на этот вопрос: во-первых, мы можем, как это часто и делается, просто его игнорировать, во-вторых, мы можем, как это делает Седергольм, говорить вообще о пропитывании боковых пород гранитной магмой и считать, что различие в характере сред до некоторой степени уменьшилось, и, в-третьих, мы можем решить, что, поскольку несомненно, что боковые породы, в которых присутствуют овоиды, не являлись магмой, из которой они могли бы кристаллизоваться, то мы должны подвергнуть сомнению магматический характер самих гранитов

<sup>1</sup> A. K. Wells and S. W. Wooldridge, *The Rock Groups of Jersey, with special Reference to the Intrusive Phenomena at Ronnez*, *Proc. Geol. Assoc.*, 42, 197—198, 1931.

рапакиви. В следующей главе мы увидим, что этот же самый вопрос возникает при изучении всех видов фельдшпатизации. Граниты рапакиви возникают более сложным, но в общем таким же образом.

Я заканчиваю дискуссию по поводу генезиса фенноскандинавских рапакиви обзором полемики между Баклундом, с одной стороны, и Эккерманом, Вегманом и другими — с другой, которая разгорелась на севере Европы в 1937—1938 гг. Эта полемика была открыта Баклундом<sup>1</sup> (статья представлена 15/I 1937 г.), поддержана Эккерманом<sup>2</sup> (2/XII 1937 г.), продолжена Баклундом<sup>3</sup> (1/II 1938 г.), подогрета Эккерманом<sup>4</sup> (16/II 1938 г.), развернута Баклундом<sup>5</sup> (3/III 1938 г.) и затем широко разглашена им<sup>6</sup> (12/VIII 1938 г.). Я даю библиографические детали, чтобы каждый мог проследить за этой дискуссией сам.

Баклунд открыл полемику в крайне резком тоне, выступив с переинтерпретацией данных другого исследователя рапакиви округа Луз Хамра (Loos Hamra) в Швеции, которые были во всех подробностях описаны Эккерманом, были истолкованы Баклундом, как гранитизированные осадки молассовых фаций (1937, стр. 247). Разница между шведскими гранитами Эккермана и финскими рапакиви является, по его мнению, следствием фациального различия первоначальных осадков на площади их отложения; рапакиви Аландских островов, которые располагаются между Швецией и Финляндией, имеют промежуточный состав. Мы можем уяснить некоторые идеи Баклунда из быстрых и энергичных ответов Эккермана.

<sup>1</sup> H. Backlund., Die Umgrenzung der Svekofenniden, *Bull. Geol. Inst. Upsala*, **27**, 219—269, 1937.

<sup>2</sup> V. Eckermann, The Genesis of the Rapakivi Granites, *Geol. Fören Förhandl.*, **59**, 503—524, 1937.

<sup>3</sup> H. Backlund, The Rapakivi Puzzle, a Reply, *ibid.*, **60**, 105—112, 1938; *ibid.*, **60**, 105—112, 1938.

<sup>4</sup> V. Eckermann, The rapakivi facts, an answer to a reply, *ibid.*, **60**, 113—115, 1938.

<sup>5</sup> H. Backlund, Zur Granitisationstheorie. Eine Verdeutlichung, *ibid.*, **60**, 177—200, 1938.

<sup>6</sup> H. Backlund, The Problems of the Rapakivi Granites, *Journ. Geol.*, **46**, 339—396, 1938.

Эккерман<sup>1</sup> показал, что иотнийские изверженные породы образуют магматическую ассоциацию, наиболее кислые члены которой генетически связаны с ее наиболее основными членами, и что граниты Рэтан (Rä-tan) были предвестниками всего этого магматического комплекса. Предположения Баклунда, конечно, нарушают единство этой ассоциации; по его мнению граниты Рэтан и граниты рапакиви не являются магматическими породами и не имеют никакой связи с основными иотнийскими интрузиями. Эккерман<sup>2</sup> начинает с сокрушительного ответного удара. Его полевые работы, говорит он, окончательно доказали, что граниты рапакиви и ассоциирующие с ними породы, выветриваясь и разрушаясь, образовывали базальные аркозы иотнийских осадков. Согласно Баклунду, такие седиментационные контакты вводят в заблуждение — в действительности они представляют собой границу поднимающегося снизу фронта мигматизации.

Эккерман упорно защищается, используя данные точных химических анализов. Диаграммы анализов кислых и основных иотнийских эруптивов пяти различных районов показывают, по словам Эккермана, «абсолютную невозможность гранитизации такого неоднородного материала, каким являются базальные иотнийские осадки; иотнийские эруптивы в пяти различных и отдаленных друг от друга районах строго подчиняются законам, определяющим последовательность настоящей магматической дифференциации внутри магматической провинции». Далее, путем сравнения химических составов рапакиви и осадочных пород, из которых, по мнению Баклунда, они образовались, Эккерман показывает, что «если мы примем теорию гранитизации, мы будем принуждены признать существование некоего мистического водного щелочного флюида, иногда очень богатого фтором и титаном» (стр. 513). По подсчетам Эккермана, этот флюид совершенно не похож на флюиды, которые, как это установлено,

<sup>1</sup> V. Eckermann, The Loos-Hamra Region, *Geol. Fören. Förhandl.*, 58., 1936.

<sup>2</sup> V. Eckermann, The Genesis of the Rapakivi Granites, *Geol. Fören. Förhandl.*, 59., 504—506, 517—520, 1937.

действуют при гранитизации архейских пород. Я вынужден указать здесь, что, по моему мнению, это последнее положение Эккермана бьет мимо цели. Эккерман считает (стр. 514—515), что структура рапакиви «типично магматическая» и что «в магматических породах ретроградная кристаллизация полевого шпата не является редкостью». Специфические черты овоидов получаются в результате «нарушения фазового равновесия (концентрации, давления, температуры) в ходе магматической кристаллизации» (стр. 515). По мнению Эккермана, в таких ненарушенных и неметаморфизованных осадках, как иотнийские песчаники, можно было бы вблизи контактов с гранитом обнаружить «следы преобразующих растворов или путей их прохождения». Однако этих следов нет (стр. 515). Далее он говорит, что кровля и почва рапакиви состоят из архейских пород. Можем ли мы в этом случае предполагать, спрашивает Эккерман, что иотнийские песчаники, из которых, по мнению Баклунда, произошли рапакиви, отложились в полости, окруженной со всех сторон архейскими породами (стр. 516). Как может Баклунд объяснять закаленные контакты порфиоров рапакиви и залегание этих пород непосредственно ниже горизонта иотнийских песчаников? (стр. 530). Больше того, граниты Рэтан обнаруживают типичные интрузивные контакты (стр. 522—523). Наконец, Эккерман спрашивает, каково происхождение всего осадочного материала, который превратился в граниты, и откуда пришли мистические флюиды, которые совершили это преобразование. Хотя гранитизация и могла иметь место в других областях сложенных неиотнийскими породами, он считает, что было бы «пустым препровождением времени строить теоретически структуры гранитизации на зыбких песках иотния». Я считаю, что первый круг дал Эккерману несколько очков.

Баклунд<sup>1</sup> открывает второй круг замечаниями о темпераменте своего противника, за которым следует формулировка того, что ему предстоит сделать. Это, во-первых, показать, что процессы гранитизации не ограничи-

---

<sup>1</sup> H. Backlund, The Rapakivi Puzzle, a Reply *Geol. Fören. Förhandl.*, 60, 105—112, 1938.

ваются отдаленными периодами и большими глубинами, а свойственны всем складчатым поясам, во-вторых, привлечь внимание к крупнейшей проблеме региональной геологии, а именно к проблеме пространства гранитов, и, в-третьих, дать некоторые соображения о количественных и качественных сторонах процесса гранитизации. Он считает, что его работа, так же как и данные Эккермана, показывает, что ихоры Седергольма не могут характеризовать природу гранитизирующего материала и что они должны меняться в зависимости от пород, претерпевающих гранитизацию; вместо термина «ихоры» лучше употреблять термин «эманация». Механизм их миграции, как мы уже видели, был указан Вегманом и другими. Доказательство этих трех пунктов было целью этого исследования Баклунда. Он продолжает указывать, что химические пересчеты Эккермана, относящиеся к иотнийской гранитизации, находятся в точном соответствии с пересчетами, относящимися к архейской гранитизации. В самом деле, пересчеты Эккермана «доказывают только то, что интерпретация Баклунда полностью согласуется с детальными исследованиями, произведенными где бы то ни было» (стр. 108). По моему мнению, это утверждение совершенно правильно. Баклунд (стр. 109—110) расширяет свой тезис: рапакивиподобные граниты залегают в нижнем докембрии и для них можно допустить, что они образовались из осадков немолассовых фаций; граниты рапакиви могут получиться из архейских кристаллических пород — «полости» в иотнийских песчаниках не оказываются необходимыми и некоторые рапакиви не обязательно образовались из осадочных пород. Он настаивает, что самая главная проблема — это проблема пространства. Гранитизация разрешает эту проблему, между тем как привлечение гигантского количества магмы, в которой может развиваться магматическая дифференциация, противоречит геофизическим данным совершенно так же, как предположение о том, что рапакиви образовались в результате дифференциации базальтовой магмы, противоречит геологическим данным (стр. 110—111).

В заключение Баклунд благодарит Эккермана за новые факты, которые он привел, и этим дал повод послед-

нему ответить статьей «Факты рапакиви, ответ на ответ»<sup>1</sup>. Эккерман начинает с едкого замечания, что загадка для одного человека, является кристально ясным фактом для другого. Он отрицает существование проблемы пространства для рапакиви, поскольку они приподняли кровлю или заняли свое место в результате площадной (areal) интрузии или глыбового перемещения. Более того, в районе работ Эккермана проблема пространства больше всего неясна как раз для основных пород, которые, повидимому, совсем не беспокоят Баклунда. Основные члены серии рапакиви, в виде иотнийских диабазов, присутствуют в количестве, вполне достаточном для того, чтобы удовлетворить требованию получения гранитной магмы из базальтовой. Явление чередования горизонтально залегающих, предположительно гранитизированных осадков с основными изверженными породами и совершенно не метаморфизованными аркозами также остается не объясненным Баклундом и, пока эта и подобные ей проблемы не будут разрешены, Эккерман не может принимать всерьез «таинственное осадочное рапакиви».

В предыдущем параграфе я отметил точку зрения Баклунда, что гранитизирующее вещество должно изменяться вместе с породами, которые претерпевают гранитизацию. Эккерман (стр. 114) ухватывается за это и говорит: «Он (Баклунд) не дает объяснения геофизическим законам, которые позволяют различным осадочным породам предопределять состав своих особых эманаций, которые их преобразуют, в результате воздействия поднимающегося фронта мигматизации». Он сомневается, что осадочные породы «имеют такую дифференциальную способность в выборе подходящего метаморфизирующего партнера». Это утверждение обнаруживает, что Эккерман, по-моему, совершенно упустил один существенный момент процесса гранитизации. Возражения Эккермана были хорошо отпарированы Мак-Грегором и Вильсоном<sup>2</sup>, которые говорят: «При метасоматизме такие породы, которые уже насыщены одним или более компонентами,

<sup>1</sup> V. Ecker mann, The Rapakivi Facts; An Answer to a Reply, *Geol. Fören. Förh.*, 60, 113—115, 1938.

<sup>2</sup> Mac Gregor and Wilson, On Granitisation and Associated Processes, *Geol. Mag.*, 70, 207—208, 1939.

не будут давать никаких реакций с этими компонентами, если последние присутствуют в проникающей среде. Различные осадки *не должны* предопределять свои собственные преобразующие эманации в результате особого воздействия поднимающегося фронта мигматизации. Скорее, из подбора приносящих веществ они берут на пробу то, что им нужно, и дают в обмен эквивалентное количество тех материалов, которые, как это можно ожидать, будут замещены в результате новых приобретений».

Во время полемики между Баклундом и Эккерманом в Америке готовилась к опубликованию обобщающая работа Баклунда. В этой статье, под названием «Проблемы гранитов рапакиви»<sup>1</sup>, Баклунд излагает свой тезис специально для тех читателей, которые не особенно хорошо знакомы с деталями геологии Фенноскандии. Здесь нет необходимости излагать всю эту статью, и я остановлюсь только на двух моментах. Первый касается влияния текстуры и структуры ютнийских осадков на характер гранитов рапакиви, образовавшихся в результате их замещения. Баклунд предполагает (стр. 392—393), что диффузия эманаций должна контролироваться плоскостями слоистости и изотермическими поверхностями. Оба контролирующего фактора располагаются горизонтально, и поэтому образующиеся рапакиви представляют собой плоские листы. Пористость молассовых осадков облегчает проникновение эманаций и образование сравнительно однородных тел замещения. Первичные осадки слоисты и хорошо сортированы, и резкие контакты рапакиви получаются благодаря влиянию этой сортированности. Следы первичной слоистости сохраняются в гранитах в виде серии расположенных на равных расстояниях горизонтальных плоскостей, характеризующихся особыми минералогическими соотношениями. Баклунд предполагает (стр. 358—359, 393), что включения в рапакиви обязаны своим происхождением первоначальному различию в степени проницаемости, так что некоторые участки песчаника, если можно так выразиться, «не были смочены» эманациями и таким образом не получили оконча-

<sup>1</sup> H. Backlund, The Probleme of the Rapakivi Granites, *Journal of Geology*, 46, 339—396, 1938.

тельного «цементирующего материала». Эти участки, естественно, не превратились в настоящий, «добротный» рапакиви.

Второй момент в обобщающей работе Баклунда (стр. 391—392) относится к детализации процесса преобразования аркозов в граниты рапакиви, который, по его мнению, контролируется колебаниями, во-первых, температуры и, во-вторых, химической природы эманаций, вызывающих метасоматизм. При этом становятся возможными те процессы кристаллизации, прорастания, поглощения, замещения и переустройства, которые и приводят к образованию сложной структуры рапакиви.

Постороннему наблюдателю может казаться, что Баклунд в этом споре значительно расширил и обобщил некоторые свои положения, в то время как Эккерман сохранил свои позиции совершенно нетронутыми. Одна из самых больших трудностей, с которой встречается интересующийся этим вопросом не фенноскандинавский геолог, происходит от применения термина «рапакиви» в геологическом смысле, т. е. в смысле просто некоторых гранитных пород верхнего докембрия. Я не могу касаться здесь этих деталей, я хочу только отметить, что те финляндские рапакиви, которые я видел в поле, по полевым наблюдениям хорошо интерпретируются, согласно представлениям Баклунда о гранитизации. Я спешу сказать, что я не видал контакта этих гранитов с иотнийскими песчаниками, а видел их контакт с различными метаморфизованными породами. Я считаю, что мы должны различать две проблемы. Первая касается образования рапакиви из иотнийских осадков в определенный момент геологической истории, а вторая — происхождения гранитных пород, имеющих такой же характер, как рапакиви Фенноскандии. В то время как первая проблема, естественно, способна возбудить сильные страсти в Фенноскандии, нас сейчас ближе касается вторая проблема: что собой представляют любые рапакивиподобные породы любого возраста.

Мы видели, что Баклунд согласился с тем, что рапакивиподобные породы имеют различный возраст и залегают в различных ассоциациях. В дискуссии о происхождении этих пород я имел случай остановиться только на

одной, относящейся к этому вопросу работе Вегмана о южной Гренландии<sup>1</sup>. Вегман (стр. 98—121) нашел, что многие из гранитных массивов южной Гренландии окружены зоной рапакиви, которые дают переходы к метаморфическим боковым породам — гнейсам, амфиболитам и т. п. В породах типа рапакиви всегда присутствуют обломки боковых пород. Эта ассоциация дает текстуры, сходные с седегерольмовскими агматитами или эруптивными брекчиями, и поэтому Вегман говорит об агматитовом фронте. По его словам (стр. 119), «структура рапакиви наблюдается в пределах агматитового фронта, который окаймляет сиенитовые массивы». Он описывает и зарисовывает прекрасные примеры богатых ксенолитами гранитов рапакиви, с развивающимися в ксенолитах рапакивиподобными полевыми шпатами. Он приходит к заключению, что все полевые наблюдения «говорят в пользу метаморфического происхождения структуры рапакиви. Ранее существовавшие породы были преобразованы в рапакивиподобные породы благодаря продвижению агматитового фронта; такие агматиты наблюдаются тогда, когда кровля сильно трещиновата или каким-либо другим способом разбита с образованием каналов, по которым могут приноситься активные летучие компоненты» (стр. 117). Вегман не может согласиться с первоначальным взглядом Баклунда, что для образования рапакиви необходимы молассовые осадки, так как в Гренландии он нашел рапакиви, который образовался из «очень различных первичных пород, самого различного возраста» (стр. 117). Он также не может согласиться и с Эккерманом в отношении его предположения об отсутствии у рапакиви пегматитов. Он говорит: «Пегматиты у рапакиви не отсутствуют, но пегматитовый материал является составной частью этой породы» (стр. 120).

Таким образом, теперь, по моему мнению, можно считать вполне установленным, что рапакивиподобные гранитные породы могут возникнуть в результате разнообразных процессов фельдшпатизации. Мы уже вкратце отметили, что этот взгляд подтверждается наблюдениями

<sup>1</sup> Wegmann, *Geological Investigations in Southern Greenland*, Part. I, *Medd. om Grønland*, 113, 2, 1938.

в Финляндии и Гренландии, и мы будем более подробно разбирать этот вопрос в следующем разделе. Однако я не могу удержаться, чтобы не привести вам один пример, взятый из Унста (Unst) на Шетландских островах. Л. Дж. Фернандо<sup>1</sup> описал «очковые граниты» из местности Хэрма Несс на острове Унст, которые содержат крупные зональные полевошпатовые овоиды типа рапакиви. В результате детального исследования Фернандо делает вывод, что «структура рапакиви, по крайней мере поскольку это касается пород Хэрма Несс, тесно связана с замещением, связанным в свою очередь с общим процессом фельдшпатизации. Представляется совершенно очевидным, что кайма плагиоклаза является каймой замещения, и также очевидна коррозия калиевого полевого шпата (стр. 123); «эти рапакиви отвечают незавершенной стадии процесса замещения калия натрием» (стр. 128). Можно привести много примеров образования рапакивиподобных полевых шпатов в ксенолитах. Я хочу напомнить вам вопрос, которым я задавался на предыдущих страницах: должны ли мы считать, основываясь на образовании структуры рапакиви, что в обстановке боковых пород сложные физико-химические факторы действуют совершенно таким же образом, как и в магматической обстановке? Для некоторых случаев ответ ясен: существует не две обстановки, а только одна. Мы рассмотрим это в общем и в частности в следующем разделе.

### КРУПНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ШПАТЫ ГРАНИТНЫХ КОНТАКТОВ

Когда мы делали обзор работ французской школы и, в частности, работ Фурне, Делесса, Мишель-Леви и Лакруа, мы видели, что термин «фельдшпатизация» с ранних времен постоянно употреблялся для обозначения процессов, происходящих на контактах гранитов, во время действия которых в боковых породах образуется боль-

<sup>1</sup> L. J. D. Fernando, *Petrology of Certain Feldspathised Rocks from Herma Ness, Unst, Shetland Islands, Proc. Geol. Assoc.*, 52, 110-130, 1941.

шое количество полевого шпата. Фурне<sup>1</sup> обсуждает эту проблему в связи с изменением глинистых сланцев, происшедшим в результате плутонического воздействия. Как мы уже видели, он отмечает, что поскольку такие породы содержат калий, натрий и кальций, постольку в них возможно образование полевых шпатов в результате простой перекристаллизации. Однако иногда полевого шпата образуется так много, что должна была иметь место импреньяция полевошпатового материала в результате какого-то капиллярного процесса. Кажется ясным, что многие из французских авторов употребляют термины «фельдшпатизация» и «гранитизация» почти однозначно, заменяя один другим. Делесс высказался совершенно ясно по этому вопросу. В конце концов полевые шпаты являются просто самыми заметными из новообразованных минералов, появляющихся в породах, претерпевших гранитизацию. Я уже разбирал в этом смысле фельдшпатизацию и теперь я могу взяться за обсуждение более специального вопроса, а именно, вопроса о развитии в боковых породах гранитных контактов крупных кристаллов полевых шпатов. Однако сначала нужно сделать некоторые критические замечания по поводу общего тезиса и привести в общих чертах несколько бесспорных примеров этого явления.

Харкер<sup>2</sup> установил, что фельдшпатизация представляет собой предполагаемую импреньяцию метаморфизующихся пород в большом масштабе полевым шпатом магматического происхождения. «Эта гипотеза, — продолжает он, — датируется тем временем, когда еще не была достаточно оценена возможность образования различных полевых шпатов как обычных продуктов метаморфизма», и выставляет в качестве предостережения тем, кто верит в фельдшпатизацию, результаты детальных исследований Гольдшмидта в Ставангере, где в прилегающих к граниту боковых породах имело место «прибавление не полевого шпата, а натрия и кремнезема» и где также, «повидимому, действительная диффузия материала не превышала

<sup>1</sup> Fournet, Die Metamorphose der Gesteine nachgewiesen in den westlichen Alpen, Freiberg, 72, 1847.

<sup>2</sup> A. Harker, Metamorphism, 250, 1932.

весьма умеренной степени». Я допускаю, что, во-первых, образование полевых шпатов без переноса вещества при метаморфизме есть факт, который допускается всеми, и в одном из предыдущих разделов мы видели, что это почти сто лет назад допускалось Фурне, этим классическим поборником фельдшпатизации. Я допускаю, во-вторых, что эти полевошпатовые «нормальные продукты метаморфизма» не похожи на плевошпатовые порфиробластические кристаллические сланцы и очковые гнейсы, столь обычные в мигматитовых областях. Далее, что бы ни подразумевали под «фельдшпатизацией», я утверждаю, что в современном понимании она не означает импреняцию полевым шпатом из магматического источника. При фельдшпатизации материал для образования полевого шпата может браться как из боковой породы, так и из внедряющихся растворов магматического или, как мы сейчас увидим, любого другого происхождения. Для меня фельдшпатизация означает ту сторону гранитизации, которая выражается в образовании полевого шпата. Так же как и Харкер, Ниггли<sup>1</sup> подчеркивает тот факт, что видимое «обогащение полевым шпатом» может иметь место без какого бы то ни было изменения валового состава породы. Он утверждает, что многие гнейсы имеют такой же химический состав, как и слюдяные сланцы, и количество развивающегося в них полевого шпата зависит не от химических, а от физических условий.

Как мы уже видели, ответ на эти критические замечания был также дан Фурне. Он заключается в том, что иногда появляется такое большое количество полевого шпата, что привнос вещества должен был бы происходить. Я думаю, что будет полезно рассмотреть несколько таких случаев, в которых мы можем быть уверены в реальности фельдшпатизации, памятуя, что под этим процессом я подразумеваю образование полевого шпата в породах, которые претерпели гранитизацию. Из бесчисленных примеров, представленных французской школой, я выбираю классический случай, описанный Барруа<sup>2</sup>, при изучении ростренонского гранита, Кот-дю-Нор. На рисунке,

<sup>1</sup> Статья Ниггли в настоящем сборнике. (Прим. ред.).

<sup>2</sup> С. Barrois, Mémoire sur le granite de Rostrenon, *Ann. Soc. Géol. Nord.*, 12, 1884.

помещенном на стр. 14 статьи Барруа, изображены неправильные жилки порфириовидного гранита в слюдястой граувакке, в которой развиваются многочисленные крупные кристаллы ортоклаза, «рассеянные без всякого порядка, так же как андалузит в сланцах по соседству с гранитом».

Наш следующий пример фельдшпатизации — описание района Ставангера Гольдшмидтом<sup>1</sup>. Это особенно хороший пример, так как он описан во всех деталях, подкреплен анализами и иллюстрирован рисунками штуфов, которые говорят сами за себя. В Ставангере регионально развитые кварцево-мусковито-хлоритовые филлиты преобразованы в порфиробластические альбитовые сланцы и очковые гнейсы. Порфиробластические альбитовые сланцы, как это показывают великолепные иллюстрации в книге Гольдшмидта (табл. III, фиг. 2, т. IV, фиг. 1 и 2, и т. X, фиг. 1 и 2), являются, очевидно, результатом фельдшпатизации. Эти сланцы залегают или в виде пластов среди гранато-слюдяных сланцев, или образуют самостоятельные массивы, или развиты в виде полос в инфицированных гнейсах. Они состоят из порфиробласт-олигоклаза (Pl № 18), заключенных в основной массе из кварца, мусковита, биотита и граната; с появлением калиевого полевого шпата при продвижении фельдшпатизации они переходят в очковые гнейсы (стр. 87—99). Рассмотрение химических анализов всей Ставангерской серии показывает, что порфиробластические альбитовые сланцы и очковые гнейсы образовались из филлитов при привносе щелочей, извести и кремнезема (стр. 108—115). Усиление этого привноса проявляется в виде увеличения количества плагиоклаза с 10—12 до 30%. Эта фельдшпатизация является типичным метасоматическим процессом.

В качестве нашего следующего примера фельдшпатизации и гранитизации мы можем рассмотреть данные Андерсона по кряжу Инио<sup>2</sup>. Андерсон, указывает, что

<sup>1</sup> V. Goldschmidt, Die Injektionsmetamorphose im Stavanger-Gebiete, *Vidensk. Skrift. I. Mat. naturv. Klasse*, 10, 81—87, 1920, 1921.

<sup>2</sup> G. H. Anderson, Granitization, Albitization and Related Phenomena in the Northern Inyo Range of California—Nevada, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 48, 1—74, 1937.

мезозойские батолитовые граниты представлены двумя резко различными типами. Один — гранит Баундари-Пик (Boundry-Peak) представлен белыми однородными биотитовыми гранитами, в которых нет ничего, что бы заставляло предполагать, что «они образовались каким-либо другим способом, нежели кристаллизацией из магмы» (стр. 73). Второй тип, гранит Пеллизьер (Pellisier) залегает между гранитом Баундари-Пик и вышележащими боковыми породами: известняками, аргиллитами и сланцами. Граниты этого типа представляют собой темные, серые порфировидные породы, весьма разнообразные по структуре и составу и содержат бесчисленное количество ксенолитов. По мнению Андерсона, последние образовались на месте путем перекристаллизации боковой породы с прибавлением большего или меньшего количества материала из проникающей их магмы, причем источником эманаций являлся гранит Баундари-Пик. Стоит привести сводку аргументов, которые были выдвинуты в пользу гранитизации.

Они заключаются в следующем (стр. 45—47).

«1) Сходство в составе и структуре между гранитом Пеллизьер и частично перекристаллизованными и замещенными породами контактовой зоны; 2) расплывчатые границы (контакты) между гранитом Пеллизьер и более древними породами; 3) переработка и усвоение наблюдаемых в граните ксенолитов; 4) разнообразие в структуре и составе; 5) «стратификационная» текстура гранита Пеллизьер, которая местами может прослеживаться и переходить в такие же текстуры ксенолитов или боковых пород; 6) серый цвет гранита Пеллизьер, как и вмещающих пород, обязан своим происхождением одной и той же причине — рассеянию железосодержащего материала; 7) в граните наблюдается увеличение биотита ближе к контакту с биотитовыми сланцами; 8) региональная структурная ориентировка не меняется в ксенолитах и 9) гранит Пеллизьер содержит силлиманит и ставролит».

Особенно важным для нас сейчас является демонстрация Андерсоном последовательных стадий перехода биотитовых сланцев в порфировидные граниты (стр. 37—38, табл. V, фиг. 1; табл. VI и в особенности фиг. 7, стр. 37). В бортах каньона обнажается разрез около двух километров длиной, в котором можно хорошо видеть этот переход, причем интересно отметить, что рисунок Андерсона (фиг. 7), представляющий этот разрез,

напоминает рисунок гранита Ростренон, сделанный Барруа пятьдесят лет назад. В Иннио процесс начинается с образования крупных порфиробластов калиевого полевого шпата, достигающих до 2,5 см в поперечнике. Они образуются в сланцах, основная ткань которых почти не изменена. На следующей стадии преобразования в основной массе сланцев по плоскостям сланцеватости появляются извилистые полоски кварца и полевого шпата. Процесс замещения продолжается до тех пор, пока лоскутки сланцев не оказываются рассеянными среди существенно гранитоподобной массы. Полевошпатовые порфиробласты сохраняются до конца процесса, залегая частью в граничной основной массе, частью в сланцевых «включениях». «В конечных стадиях замещения сланцев ксенолиты исчезают или делаются неразличимыми, и порода становится во всем похожей на порфиоровидный гранит с крупными фенокристаллами, обычно заключающими в себе биотит и кварц. Гранит этого типа имеет широкое распространение в северной части кряжа Иннио» (стр. 38). Химические анализы снова показывают, что при процессе гранитизации имеет место привнос кремнезема, извести и натрия (стр. 39—40).

Превосходные примеры фельдшпатизации из южной Гренландии были описаны и зарисованы Вегманом<sup>1</sup>. Из своих наблюдений над развитием полевошпатовых линз, глазков или порфиробласт Вегман (стр. 45—46) делает вывод, что «порфиоровидный гранит... может иметь различное происхождение и не отвечает одному-единственному генетическому типу». Его описание (стр. 106—108) гранита Сидпровен (Sidproven) представляет для нас сейчас большой интерес. Этот гранит является грубо порфиоровидным и дает переходную зону к мигматитам. «Переход начинается с образования в гнейсах и амфиболитах крупных полевых шпатов, которые постепенно собираются в большие скопления... Когда преобразование идет вдоль всех возможных направлений, остается рой включений, сохранивших еще единую ориентировку». Вегман (фиг. 59, стр. 108) приводит фотографию породы, которая заслужи-

<sup>1</sup> Wegmann, Geological Investigations in Southern Greenland Part. I, *Medd. om Grønland*, 113, No 2, 1938.

вает тщательного изучения. Она имеет объяснение: «имбибиция кетилидианских (Ketilidian) мигматитов и переход их в более молодой гранит», которое является просто констатацией того, что можно наблюдать. В ранее вышедшем очерке геологии части северо-восточной Гренландии Вегман<sup>1</sup> описывает фельдшпатизацию кварцита. Почти чистые кварциты по мере перехода в зону гранитизации обнаруживают все больше и больше полевого шпата. Ясно, что для полевого шпата, который находится в «структуре кварцита», необходимо допустить миграцию или импреняцию материала посредством механизма масляного пятна Термье. «Там, где кварциты и сланцы проникнуты полевым шпатом, они становятся гнейсами или гранитами. . . Мигрирует не весь материал, а только часть его, именно та, которая дает возможность образоваться полевым шпатам» (стр. 23).

Много примеров фельдшпатизации из мигматитовой области Шотландии, которые я, не колеблясь ни один момент, могу назвать превосходными, были даны мной самим и моими учениками. Так, Л. Дж. Фернандо<sup>2</sup> описал и зарисовал очковые граниты и очковые гнейсы, образовавшиеся в результате пропитывания преимущественно пелитовых пород Унста флюидами, содержащими натрий и калий. Один взгляд на две таблицы, сопровождающие работу Фернандо, убедит кого угодно в реальности фельдшпатизации в Хэрма Несс. Двенадцать лет назад я описал развитие крупных кристаллов полевого шпата в пелитовых породах мигматитовой области центрального Сутерлэнда<sup>3</sup>, а недавно Ченг детально исследовал этот процесс в северном Сутерлэнде<sup>4</sup>. В результате изу-

<sup>1</sup> Wegmann, Preliminary Report of the Caledonian Orogeny in Christian X's Land, *Medd. om Grønland*, 103, No 3, 1935.

<sup>2</sup> L. D. Fernando, Petrology of Certain Feldspathised Rocks from Herma Ness, *Unst. Shetland Island, Proc. Geol. Assoc.*, 52, 110—150, 1941.

<sup>3</sup> H. H. Read, The Geology of Central Sutherland. *Mem. Geol., Surv. Scotland*, 116—118 (Plate II. B., Fig. 8), 1931.

<sup>4</sup> Y. C. Cheng, A. Hornblendic Complex including Appinitic Types, in the Migmatite Area of North Sutherland, Scotland, *Proc. Geol. Assoc.*, 53, 67—85, 1942, especially Figs. 3 and Plate 2. Figs. 2 and 3; The Migmatite Area around Bettyhill, North Sutherland, *Quart. Journ. Geol. Soc.*, 99, 107—154, 1944.

чения серии образцов, собранных точно вдоль простира-ния претерпевших мигматизацию слоев, Ченг показал, что образование инфицированных гнейсов (permeation gneiss) является по своей природе существенно фельдшпатизацией, с образованием в данном случае плагиоклаза. Изменения состава при этом находятся в согласии с тем, что предполагается для аналогичных пород Норвегии и Америки. Ченг описал ряд других случаев фельдшпатизации. Некоторые мигматитовые производные пелитовых пород обязаны, повидимому, своим происхождением циркуляции богатых калием растворов вдоль плоскостей сланцеватости, с образованием ортоклаза из ранее существовавших минералов; однако часть калия, потребного для образования полевого шпата, несомненно, бралась «in situ». В результате петрологического и химического исследования других пелитовых пород он снова показал действительность фельдшпатизации, при которой главным продуктом новообразования является олигоклаз. Ченг сомневается, могут ли некоторые из его эруптивных пород быть изверженными в действительном смысле этого слова. «Изверженные (igneous) пласты могут быть просто теми каналами, по которым могло неоднократно внедряться большое количество магматических флюидов, реагирующих с окружающими боковыми породами с образованием различных типов гранитных пород». Почти все изменения, наблюдавшиеся Ченгом в его мигматитах, рассматриваются им как результат метасоматической активности довольно разжиженных щелочных флюидов, и он предполагает целую серию преобразований в изученных им породах, которые идут в соответствии с нарушениями химического и физического равновесия.

В качестве моего последнего примера гранитизации я цитирую детальную работу Рейнольдс<sup>1</sup> об орого-викованных силурийских осадках, заключенных в гранодиорите Ньюри. На первой стадии процесса, благодаря фиксации приносимых натрия, извести и кремнезема и одновременному выносу магнезии и окислов

<sup>1</sup> D. L. Reynolds, Granitisation of Hornfelsed Sediments in the Newry Granodiorite of Goragwood Quarry, Co Antrim, *Proc. Roy. Irish. Acad.*, 48, B., No 11, 231—265, 1943.

железа, в роговиках образуются небольшие неправильные тела трондjemита (олигоклазового гранита). Во вторую стадию привнесенный ранее калий фиксируется в порфириобластах микроклина и в телах гранодиоритового характера. Это еще раз демонстрирует, что привнос натрия, калия и кремнезема вызывает сложные серии химических превращений, которые ведут к глубоким изменениям первоначальных пород.

В приведенных выше типичных примерах фельдшпатизации я с особой тщательностью указывал вам на ряд таблиц и рисунков. Хотя «притти и увидеть» было бы наиболее приятно и полезно, в особенности в наши дни, я считаю, что и эти иллюстрации дадут возможность рядовому читателю представить себе реальность этих процессов. Я сделал выбор из большого количества фактического материала; я мог бы взять примеры у десятков авторов из всех частей света. Только тот, который, как Бурбоны, ничего не забыл и ничему не научился, может отрицать действительность превращения «твердой породы в породу гранитного характера без прохождения через магматическую стадию». Мы уже видели, между прочим, что многие из ранних стадий гранитизации отмечены развитием в гранитизирующихся породах крупных порфириобластов полевого шпата. Теперь мы должны рассмотреть это явление с несколько более специфической точки зрения и разобрать то, что, как я считаю, является в нем наиболее существенным.

На предшествовавших страницах я отметил наблюдения Фурне над ростом крупных плагиоклазовых кристаллов в роговиках и Котта — над крупными кристаллами ортоклаза в диоритовых обломках, заключенных в гранитах Тюрингенского леса. Я напоминаю вам также о «лошадиных зубах» Мишель-Леви из Фламанвиля — крупных ортоклазовых кристаллах, находимых в ксенолитах и идентичных тем, которые придают окружающему граниту порфириовидный облик. Я напоминаю также обычное нахождение зональных овоидов типа рапакиви в боковых породах, прилегающих к массивам рапакиви, как это особенно хорошо видно в Букгольмских контактах в Финляндии и очень точно зарисовано Вегманом в южной Гренландии. Я уже дважды задавал вопрос, который мне

кажется основным вопросом гранитизации: должны ли мы считать, как это иллюстрируется образованием структуры рапакиви, что сложный физико-химический контроль действует в условиях боковых пород точно таким же образом, как в магматических условиях? Этот вопрос возникает в особенно ясном виде в связи с полевыми шпатами рапакиви, однако тот же вопрос возбуждают очень может быть и все порфиоровидные граниты.

Небольшое тело гранита Шэп (Shap) в Уэстморлэнде было исследовано Харкером и Марром<sup>1</sup> и затем позже Д. Р. Грантамом<sup>2</sup>. Гранит характеризуется присутствием крупных розоватых кристаллов ортоклаза, залегающих в серой среднезернистой основной массе, в которой можно различить кварц, биотит и плагиоклаз. Вместе с несомненными ксенолитами гранит содержит более темные и тонкозернистые округлые пятна, которые интерпретировались Харкером и Марром (стр. 291), как дериваты нижележащей, более основной магмы. В этих темных пятнах присутствуют крупные полевошпатовые кристаллы, совершенно такие же, как и в самом граните. Как отметил Грантам, эти кристаллы были приняты за вкрапленники и потому служили доказательством того, что содержащие их темные пятна являются продуктами дифференциации или сегрегации магмы. Грантам показал (стр. 326—327), что микроструктура этих пятен во всех деталях параллелизуется с микроструктурой метаморфизованных андезитовых боковых пород, и сделал вывод, что крупные кристаллы являются порфиробластами, кристаллизующимися из растворов. Эти растворы внедрились в проницаемые ксенолиты андезита, которые сами сделались сильно метаморфизованными и импреньированными.

Полевые шпаты шэпских гранитов были изучены Э. Спенсером<sup>3</sup>, который показал, что оптические свойства ортоклазовых порфиробластов, заключенных в

<sup>1</sup> A. Harker and Marr, The Shap Granite and its associated igneous and metamorphic rocks, *Quart. Journ. Geol. Soc.*, 47, 286—328, 1891.

<sup>2</sup> D. R. Grantham, The Petrology of the Shap Granite, *Proc. Geol. Assoc.*, 39, 299—331, 1928.

<sup>3</sup> E. Spencer, The Potash-Soda-Felspars, II, Some applications to petrogenesis, *Mineral. Mag.*, 25, 111—113, 1938.

«почти пелитовых» (semipelitic) ксенолитах, идентичны оптическим свойствам ортоклазовых фенокристаллов в гранитах. Получается впечатление, что здесь не два, а один полевой шпат.

Спенсер (стр. 113—114) далее переходит к изучению крупных кристаллов полевого шпата в ксенолитах глинистых сланцев Мальмсбери (Malmesbury), залегающих в клуфском (Kloof) граните Кэптауна, а также и самих ксенолитов и гранитов. Его вывод стоит процитировать:

«Интересно наблюдать, что если метаморфизм отдельного ксенолита дошел до стадии полного его кристаллического перестроения с гомогенизацией полевошпатовых порфириобластов, но без явлений настоящего переплавления, то в результате должна получиться порода, весьма сходная, если не идентичная, порфириовидным, богатым калием гранитам» (стр. 114).

«Нахождение порфириобластов калинатровых полевых шпатов в ксенолитах и им подобных метаморфизованных породах в условиях, исключающих возможность их прямого затвердевания из магмы, вызывает вопрос, насколько законно считать полнокристаллическую породу, даже имеющую типично гранитный облик, продуктом прямой магматической кристаллизации. Тот процесс, который привел к появлению порфириобласт, если он продолжался более долгое время или происходил при более высоких температурах, мог дать полнокристаллическую гранитную структуру без того, чтобы порода даже приблизилась к жидкому состоянию» (стр. 115).

Уэлс и Вулдридж<sup>1</sup> в своем отчете о гранитах Джерсей (Jersey) делают ссылку на вышеупомянутые контакты клуфского гранита. Они замечают, что измененный гранит в Си-Пойнт (Sea Point), в Кэптауне, обладает поразительным сходством с контактированными породами Ронез (Rones), Джерсей, «особенно в отношении резко идиоморфных порфирировых полевых шпатов, которые по мере ассимиляции постороннего вещества начинают преобладать все больше и больше». В ряде случаев Уэлс и Вулдридж считают вероятным, что эти южноафриканские порфирировые полевые шпаты «образовались в боковых породах ранее, чем в граните, хотя и не легко дать объяснение их генезиса таким путем». Вместе с тем они

<sup>1</sup> A. K. Wells and S. W. Wooldridge, *The Rock Groups of Jersey, etc., Proc. Geol. Assoc.*, 42, 197—198, 1931.

все допускают, что порфиновые полевые шпаты пород Джерсей имеют преимущественно гранитное происхождение, как это «доказывается существованием некоторых розовых кристаллов с тонкой белой каемкой, .. состоящих из ядер калиевого полевого шпата, окруженных олигоклазом, отображающих, таким образом, увеличивающуюся основность магмы, по мере усиления контаминации». Читатели настоящей статьи будут в состоянии оценить вескость этого доказательства.

Некоторые явления, весьма похожие на те, которые были описаны Грантамом в массиве Шэп, были встречены Томасом и Кэмпбеллом Смитом<sup>1</sup> в Трегастельских (Trégastel) гранитах и объяснены ими совсем иначе. В Трегастеле присутствующие в граните ксенолиты основных изверженных пород содержат крупные полевые шпаты, которые «идентичны полевым шпатам гранита» (стр. 289). Эти полевые шпаты и «даже сложные участки, состоящие из гранитного материала», были извлечены из гранита (стр. 286). Хотя «типичные структуры изверженных пород сохраняются в более основной породе в течение всего процесса гибридизации, ... некоторая степень жидкостности все же проявляется. На это указывает присутствие внутри гибридных основных тел ксенокристаллов полевого шпата, а также настоящего гранитного материала, который должен был быть извлечен из гранита и механически внедрен в гибридные породы» (стр. 289—290). В отношении этого механического внедрения полевых шпатов Томас и Кэмпбелл Смит согласны с более ранним мнением Г. Коля<sup>2</sup> и Харкера<sup>3</sup>. Они не могут согласиться, например, с мнением Грантама, что кристаллы ортоклаза в Шэпе выросли в самих ксенолитах.

<sup>1</sup> H. N. Thomas and W. Campbell Smith, Xenoliths of Igneous Origin in the Trégastel-Ploumanac'h Granite, Côtes du Nord, France, *Quart. Journ. Geol. Soc.*, 83, 274—296, 1932.

<sup>2</sup> G. Cole, On derived Crystals in the Basaltic Andesite of Glasdrumman Port Co Down, *Sci. Trans. Roy. Dublin Soc.*, Ser. 2, 5, 239—248.

<sup>3</sup> A. Harker, Tertiary Igneous Rocks of Skye, *Mem. Geol. Surv.*, 219, 1904.

В этом отношении полевые наблюдения не оставляют никакого сомнения. Сотни обнажений показывают, что полевые шпаты *не могли* быть «внедрены механически». В самих примерах из Трегастеля в ксенолитах «сохраняются текстуры изверженных пород». Мне приходит на ум пример очень крупных ксенолитов пелитовой породы с резкими контактами, залегающих в порфиоровидном граните Скоу (Skaw) из Унста на Шетландских островах<sup>1</sup>. В центральных частях ксенолитов присутствуют крупные кристаллы полевого шпата величиной до нескольких сантиметров, которые идентичны порфиоровым полевым шпатам гранита, однако слабая слоистость, обнаруживающаяся часто в трех измерениях, не нарушена в них ни в малейшей степени. «Механически внедренные» полевые шпаты в этих случаях должны достаточно хорошо прятать следы своего происхождения.

Неспособность магматистов интерпретировать ясные полевые факты возникает, конечно, от инерции господствовавшей целое столетие веры в магматическое происхождение всех гранитных пород. Эта инерция еще во много раз увеличилась благодаря добавлению веских физико-химических аргументов, которые «объясняли» явление. Нужно иметь достаточно храбрости, чтобы отбросить авторитеты, подойти к проблемам с другой стороны и посмотреть на них с совершенно отличной точки зрения.

Мы уже видели, что неотъемлемыми положениями магматистов являются: во-первых, что порфиоровидные граниты затвердели из магмы и, во-вторых, что включения, содержащие такие же порфиоровые полевые шпаты, должны быть продуктами дифференциации или сегрегации этой магмы. Крупные полевошпатовые кристаллы становятся критерием магматического происхождения содержащей их породы. Нужно как-то объяснить тот факт, что часто включения имеют совершенно такой же вид, как и изверженные породы; как мы видели, Харкер и Марр, например, с легкостью произ-

<sup>1</sup> *Proc. Geol. Assoc.*, 53, 107, 1942,

водят темные и более основные пятна шэпского гранита из нижележащей более основной магмы. Однако этот аргумент оказывается полностью несостоятельным, когда включения, содержащие спорные полевые шпаты, имеют вне всякого сомнения осадочное происхождение; в действительности должно быть как раз наоборот, если мы не будем искать спасения в объяснении их появления путем механического внедрения. Теперь это формулируется следующим образом: так как включения, содержащие полевые шпаты, имеют осадочное происхождение, то и порода, вмещающая ксенолиты и такие полевые шпаты, имеет также осадочное происхождение. Порфиroidные граниты образовались из осадочных пород благодаря усилению процесса фельдшпатизации.

Обе линии доказательств основаны на идентичности полевых шпатов, а это для большого количества случаев доказано совершенно определенно. Является ли гипотеза осадочного происхождения более правильной, нежели ныне дискредитированная гипотеза магматического происхождения? Безусловно, да; так как, если мы и можем доказать осадочное происхождение включений, являющихся ключом к решению этого вопроса, то никто не может *доказать* магматическое происхождение содержащих их порфиroidных гранитов. Ниггли аргументирует фактом обилия лав гранитного состава. Однако это не доказывает существования гранитной магмы, это просто регистрирует факт обилия лав гранитного состава.

Можно, конечно, считать, что два типа полевых шпатов, хотя они по общему признанию и идентичны друг другу, действительно образовались в двух совершенно различных средах — один в магматической жидкости, а другой — в твердой породе. Я не могу удержаться от соблазна отметить, как это сделал Веллингтон по другому случаю, что «если можно верить в это, то можно верить во все, что угодно». Если это действительно верно, то, принимая во внимание глубокие различия между этими двумя средами, я думаю, что учение о магматической кристаллизации в значительной своей части теряет свой смысл. Я думаю, что более

разумно и, в конце концов, более честно утверждать, что для роста полевых шпатов существует только одна среда, а именно, твердая боковая порода.

Во время всех этих дискуссий мы имели перед глазами фенокристаллы, порфиновые кристаллы или порфиробласты калиевого полевого шпата. Мы делали так потому, что они, как указывают их названия, представляют собой наиболее наглядные объекты для наблюдения. Мы должны помнить, однако, что следует рассмотреть также и поведение более мелких и менее заметных, но, тем не менее, таких же важных элементов породы. Я имею в виду, например, появление в шэпских включениях кислого плагиоклаза и, возможно, кварца. Это имеет место также в ксенолитах Скоу (Skaw) и отмечено во многих других контактах ксенолитов. Далее, в зависимости от природы боковых пород возникают железо-магнезиальные минералы — биотит или роговая обманка. По мере продолжения образования этой типично гранитной комбинации, ксенолит боковой породы постепенно переходит в гранит. Я вспоминаю, например, замечание Спенсера по поводу ксенолитов глинистых сланцев Мальмсбери (Malmesbury), присутствующих в клуфских гранитах. Чтобы в этом убедиться, рассмотрите внимательно первую попавшуюся *крупную* полированную плиту шэпского или корнуэльского порфировидного гранита. В этих предположениях, которые появились потому, что мы правильно смотрим на вещи, нет ничего таинственного или сложного.

Каждый разумный человек должен допустить, если он только потрудится рассмотреть диаграммы и таблицы, иллюстрирующие выше цитированные статьи, что гранитизация действительно имеет место в крупных мигматитовых комплексах. Я полагаю, что мы теперь должны допустить, что даже в случае очевидных «изверженных» гранитов или, как их часто называют, «собственно» гранитов, или «настоящих» гранитов гранитизация может также быть действительной. Многие из этих «настоящих» гранитов кажутся изверженными, они вызывают представление об эруптивности характером своего залегания и, как говорит Лаппаран, «их появление

в данном месте кажется внезапным»<sup>1</sup>. Гранитные породы, образовавшиеся в результате гранитизации, могут и часто действительно вызывают представление об эруптивности — они, несомненно, появляются внезапно. Мы можем вспомнить точку зрения Вегмана, что там, где фронт гранитизации неподвижен, образуются резкие контакты, которые, однако, не являются интрузивными. Особые условия температуры, давления или концентрации могут привести к тому, что продукты реакций, шедших при гранитизации, будут давать резкие, как ножом обрезанные, границы. Следует, однако, считать, что некоторые граниты заняли свое место в результате интрузии. Могут ли продукты гранитизации оказаться в состоянии перемещаться или течь, как мигма или магма? Если это возможно, тогда может существовать крупное взаимосвязанное семейство гранитных пород, включающее в себя продукты гранитизации, мигматиты и магматиты. Эту возможность мы рассмотрим в следующем разделе.

#### МОБИЛИЗАЦИЯ (ПРИБРЕТЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ)

При интрузии должно иметь место перемещение материала. Вегман<sup>2</sup> при разборе терминов, связанных с изучением мигматитов, на что я уже ссылался, определяет интрузию как насильственное внедрение магмы (*the entrance of magma*). По общему мнению, многие интрузии состоят из магматического или мигматического материала (поскольку они могут быть отличимы друг от друга). Но нужно твердо помнить, что различные другие породы — каменная соль, известняк, глина и т. п., могут обнаруживать интрузивные взаимоотношения. Достаточно, чтобы движение было только весьма незначительным, — условия интрузии или эруптивности будут одинаково хорошо выполнены вне зависимости от того, передвинется ли порода на один сантиметр или на один километр. Если движение происходит в значительном масштабе, то в результате, как подчеркнул

<sup>1</sup> I. Lapparent, *Leçons de Petrographie*, 79, 1923.

<sup>2</sup> Wegmann, *Zur Deutung der Migmatite*, *Geol. Rund.*, 26, 315, 1935.

в 1869 г. Делесс, интрузивное тело может обособиться от первоначальной среды, с которой оно было генетически связано, и появиться в новой обстановке, обусловленной теми или иными механическими факторами. Этот пункт не может быть переоценен, он должен постоянно приниматься во внимание при всех исследованиях контактов. Разберем для примера такие контакты, которые были описаны и зарисованы Харкером в районе Скай<sup>1</sup>.

Здесь габбро и граниты имеют чрезвычайно извилистые контакты с известняками. Форма реликтов известняков вне всякого сомнения, по крайней мере для меня, показывает коррозию и замещение магмой. Тот факт, что ни габбро, ни гранит не обнаруживают никаких следов контаминации известняками, указывает (опять-таки, для меня) на то, что такие продукты взаимодействия между магмой и известняками, находившиеся когда-то на контактах, теперь переместились в какое-то другое место.

Чрезвычайно интересно, что попавшие на новое место продукты этих замечательных реакций при изучении отдельных участков их контактов могут представлять совершенно неразрешимые проблемы.

В отношении нашей специальной задачи, касающейся того, каким образом продукты гранитизации становятся интрузивными, я могу напомнить некоторые положения, изложенные на предыдущих страницах настоящего доклада, а также в первой его части. Мы видели, например, что Вегман<sup>2</sup> полагал, что гранит Ханко в основном представляет собой боковую породу, пропитанную гранитными растворами. Там, где продукты этого пропитывания оставались на месте их образования, мы имеем область гранитизации, однако пропитывание может дать пропитываемой массе способность к движению, и если это происходит при достаточном сопротивлении боковых пород, то в результате может произойти гранитная интрузия. Мы можем вспомнить

---

<sup>1</sup> A. Harker, *Tertiary Igneous Rocks of Skye, Mem. Geol. Surv.*, 98—99, 132—135, Figs. 20, 29, 31, 1904.

<sup>2</sup> Wegmann, *Beiträge zur Kenntnis der Svecofenniden in Finnland*, I, *Bull. Comm. Géol. Finlande*, 89, 58, 1931.

также предположения Вегмана<sup>1</sup> о перекристаллизации в сильно сжатых сводах складчатого фундамента, в результате чего происходит прорывание складчатых гнейсов гранитными штоками. При продолжающихся перемешивании и перекристаллизации выступов этого фундамента все черты их мигматитового происхождения могут потеряться в результирующих гранитных интрузиях. В глубоких зонах интрузивные породы занимают свое место благодаря действию трех типов движений — молекулярного движения вещества, складчатых движений боковых пород и краевых движений<sup>2</sup>.

Если мы обратимся к первой части настоящей статьи, мы заметим, что «школа Озерной области», возглавляемая Клифтоном Уордом и Грином, утверждала, что при гранитизации увеличение степени метаморфизма должно привести к интрузии. Уорд, например, говорит, что «гранитная масса, образовавшаяся благодаря метаморфизму пород *in situ*, почти наверняка в некоторой части становится интрузивной массой<sup>3</sup>. Мы можем также вспомнить три типа гранита Грина: слоистые и бесформенные граниты, образовавшиеся вследствие метаморфизма на месте, и эруптивные граниты, которые «с силой внедрились в те породы, среди которых они залегают». Это «эруптивное свойство может быть хорошо объяснено увеличением количества энергии того метаморфического процесса, который привел к его возникновению»<sup>4</sup>.

Возможность движения продуктов гранитизации была основным принципом ранней французской школы. Так, Вирле в сборнике 1847 г., который мы уже рассмотрели, высказывается по этому поводу совершенно ясно:

«Поднятие той или иной породы не обязательно является следствием ее изверженного происхождения, так как в некоторых случаях метаморфизм мог сам вызвать такое поднятие, в результате давления на нижележащие массы»<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Zur Deutung der Migmatite, *Geol. Rund.*, 26, 334—338, 1935.

<sup>2</sup> Geologische Merkmale der Unterkruste, *Geol. Rund.*, 26, 45, 1936.

<sup>3</sup> *Quart. Journ. Geol. Soc.*, 30, 1876.

<sup>4</sup> *Physical Geology*, 450—451, 1882.

<sup>5</sup> *Bull. Soc. géol. Fr.*, 4, 2nd Series, 505, 1847.

Посмотрим теперь, что по этому поводу думают геологи Фенноскандии. Как мы уже отметили выше, Седергольм<sup>1</sup> считает, что «гранитный ихор в состоянии тонко проникать более древние породы, придавая им новую «палингенную эруптивность». Следует вспомнить, что Баклунд выдвинул ряд стадий увеличивающейся мобильности с конечными членами мигматитов — палингенитом и диапиритом, которые возникают в результате увеличивающейся активности ихоров. Он довольно подробно разобрал вопрос о мобилизации. Однако, прежде чем я перейду к его рассуждениям, я должен сказать, что для меня мобилизация (mobilisation) является обычным английским словом, имеющим обычное значение, а именно, приобретение подвижности. Очень плохо, если «идея о мобилизации» «принимает некоторое таинственное значение». Если нужен технический геологический термин (для того, я думаю, чтобы запутать вопрос), то вы можете выбрать термин «реоморфизм» (rheomorphism), определяемый Баклундом как

«весь процесс, благодаря которому порода частично или полностью превращается в жидкость, с введением большего или меньшего количества нового материала, диффундирующего в породы».

Баклунд считает, что гранитизация ведет к увеличению количества материала в данном пространстве и что это увеличение невелико, в случае если гранитизирующиеся породы являются пелитовыми осадками, так что получающиеся при этом продукты гранитизации остаются на своем месте. Однако в случае, если гранитизирующиеся породы представлены известняками или кварцитами, увеличение массы довольно значительно, и тогда продукты гранитизации становятся мобильными и могут образовывать интрузии. По моему мнению, основания, на которых Баклунд строит свою аргументацию, могут вызвать сомнение. Так как при гранитизации существенных изменений удельного веса пород не происходит и геометрия первичных пород обычно

<sup>1</sup> Migmatites, II, 134—135.

также меняется весьма мало, то я предпочитаю думать, что если происходит привнос вещества в породу, то должен происходить и вынос его оттуда; думаю, что этим путем мобилизация не может быть объяснена.

Теперь мы можем рассмотреть некоторые английские гипотезы о мобилизации. После превосходного изложения химического и физического механизма метасоматизма в процессе гранитизации Мак-Грегор и Вильсон<sup>1</sup> продолжают обсуждать, может ли один метасоматизм вызвать подвижность. Они отмечают, что если образуется в достаточном количестве интергранулярная жидкость, то связанность между составными частями породы должна теряться. Масса, состоящая из сферических зерен, должна стать подвижной, если 26 процентов ее объема превратятся в жидкость. В природных условиях, при неправильной форме зерен, притоке флюидов и при наличии влажности, мобильность может быть достигнута с большей легкостью. Изменения температуры и давления и введение эманаций в уже нагретые породы содействует развитию подвижности. Мне кажется, что эти предположения являются весьма правдоподобными. Не может быть сомнений, что такая смесь кристаллов и жидкости может двигаться с помощью подобного рода «шарикоподшипников».

Недавно вопрос о гранитизации был разобран в ряде работ Рейнольдс. В качестве примера я рассмотрю одну из них<sup>2</sup>. Рейнольдс упоминает (стр. 355) о породе, которая «является *изверженной* только в том смысле, что материал ее временно был в подвижном состоянии. Это явилось результатом локального ультраметаморфизма, стимулированного внедрением высокоэнергизованных эманаций». Считается, что осадочные породы приобретают способность к перемещению благодаря процессу переплавления (*transfusion*), который является «существенно метасоматическим процессом, обязанным своим происхождением действию эманаций».

<sup>1</sup> B. Mac Gregor and G. Wilson, On Granitisation and Associated Processes, *Geol. Mag.*, 76, 210—212, 1939.

<sup>2</sup> D. L. Reynolds, The Two Monzonitic Series of the Newry Complex, *Geol. Mag.*, 73, 337—364.

Действительное движение... переплавленного осадочного материала может быть следствием как внутреннего расширения, зависящего от метасоматического привноса (включая и энергию), так и от внешнего стресса (стр. 355). Мобилизованные осадки «дают доказательство некоторой задержки в процессе возникновения магмы» (стр. 358) и «процесс переноса достигает своей наивысшей точки в образовании магмы» (стр. 360). Что касается меня, то я предпочел бы в этих последних определениях вместо термина «магма» употреблять термин «мигма».

Было бы просто «твердолобым» упрямством отрицать возможность подвижности продуктов гранитизации, вызываемой присутствием поровой магмы, внедрением флюидов, повышением температуры и увеличением давления. Никто не отрицает факта существования подвижности в механически аналогичных явлениях, горных обвалах и оползнях. Если, однако, в продуктах гранитизации произошли такие движения, в результате которых они сделались интрузивными телами, должны ли сохраниться в затвердевших интрузивных породах какие-либо доказательства этого движения. Паста кристаллов со смазкой незначительного количества флюида с силой перемещена в новое место; будет ли движение этого сложного материала как-то зафиксировано в структуре конечной породы?

По мнению Мак-Грегора и Вильсона (стр. 210) «полная жидкость какой-либо крупной массы никогда не была доказана окончательно. В большинстве случаев представления о подвижной каше, состоящей из кристаллов и жидкости, должны хорошо соответствовать наблюдаемым фактам». Я думаю, что это верно. В кристаллических породах наблюдается огромное количество структур, которые, в зависимости от воззрений наблюдателя, могут интерпретироваться самыми различными способами. Далее, в этих горячих и пропитанных флюидом пастах, связанных с активными источниками, имеются большие возможности для гомогенизации. Наконец, во многих интрузивных массах имеются несомненные доказательства течения твердых частиц в жидкости.

## «ГРАНИТЫ» И «ГРАНИТЫ»

В предыдущем разделе моего доклада я разобрал, что является существенным для продуктов, которые образовались из мигмы. Мы должны помнить, однако, что, согласно многим исследователям, магма, эта «*полностью жидкая порообразующая субстанция (rock-substance)*», может также возникать во время гранитизации. Мы отметили, например, положение Седергольма относительно анатексиса, который может приводить к образованию магматических тел. Мы отметили другие предположения о гранитной магматизации, высказанные Хеттоном, Ляйелем или Термье, которые отдают предпочтение интенсификации метаморфических процессов, а также теорию селективного переплавления Эскола. Все образовавшиеся таким путем магматические тела могут быть с силой перемещены в новые места и затвердеть там в виде изверженных пород. Они могут образовывать некоторые малые тела секущих гранитов на более высоких горизонтах. Когда, в добавление ко всему, мы вспомним предположения относительно образования первичной гранитной магмы путем плавления или частичного плавления сиалического слоя, которые я в общих чертах обрисовал в первой части моего доклада, мы увидим, что могут существовать, как говорит Грин, *граниты и граниты*.

Однако мое мнение таково, что в действительности у нас нет свободного выбора между многими предложенными теориями происхождения гранита. Возможности нашего выбора ставит предел одна гигантская проблема, а именно проблема пространства. Каким образом гранитные массы занимают свое положение (*get into their position*)? В случае небольших гранитных тел мы можем разрешить проблему по структурной линии, предположив, что внедрение гранитной магмы или мигмы стало возможным благодаря образованию свода, котлообразным оседаниям, блоковым поднятиям и другим процессам. Однако для крупных масс гранитов вопрос этим путем разрешить нельзя; для интрузий с гигантским объемом магмы еще не придумано такого механизма, который объяснял бы их появление. Един-

ственное решение заключается в предположении, что в действительности крупных тел гранитной магмы никогда не существовало. Крупные гранитные массы образовались в результате замещения, они являются продуктами гранитизации. Многие из небольших гранитов могут, конечно, также иметь такое же происхождение, однако одни из них могут образоваться в результате затвердевания мигмы, а другие — в результате затвердевания магмы. Таким образом, несмотря на то, что могут быть «граниты и граниты», большая часть из них принадлежит к одному типу и все они, вероятно, имеют одно общее происхождение.

Внимательный и придирчивый читатель может вставить замечание, что я все время употребляю термин «гранит» в чересчур вольном стиле. Он может спросить, не определил ли я гранит в первой части моего доклада как глубинную изверженную породу и не определил ли я изверженную породу как породу, затвердевающую из магмы, а магму как целиком жидкую породообразующую субстанцию. Я отвечу, что да, я определил так магму и изверженную породу, но я заявляю, что приведенное определение гранита принадлежит стандартным учебникам, а не является моим. По моему мнению, только очень немногие граниты могут считаться изверженными породами в том смысле, как я их определил, но существует громадное количество гранитных пород, которые не являются изверженными. Классическое определение превосходно для одной небольшой группы гранитов, но оно не действительно для большинства из них. Я склоняюсь к предложению о новой системе номенклатуры горных пород, так как авторитеты смотрели слишком узко и касались только меньшей части всех гранитов. Если вас не затруднит вернуться назад к первой странице первой части моих «Размышлений», вы найдете там превосходное определение гранита — превосходное, я полагаю, именно потому, что оно дано человеком, обладающим лишь незначительными познаниями в петрологии. Оно дано Новым Английским Словарем и гласит: это «кристаллически-зернистая порода, состоящая существенно из кварца, ортоклазового полевого шпата и слюды; в большом количестве приме-

няется в строительстве». Здесь есть все необходимое, всякие дальнейшие ограничения являются только око-вами для свободной мысли.

### ВОЗВРАТ К ЛЯЙЕЛЮ

При рассмотрении работ французской школы мы видели, что многие из ее выдающихся представителей, именно: Вирле, Эли де-Бомон, Делесс, Мишель-Леви, Термье и другие, придерживались мнения, что существует тесная связь между образованием гранита и региональным метаморфизмом. Де-Бомон, например, все время повторял, что происхождение слюдяных сланцев, гнейсов и гранитов — это один общий вопрос, огромная проблема, самой сутью которой является вопрос о происхождении гранитов. Делесс и Термье также считали, что образование магмы, интрузия и региональный метаморфизм являются следствиями одной причины — высокоэнергизованных преобразований, происходящих в плутонических и метаморфических породах. Для Мишель-Леви контактовый метаморфизм переходит в региональный метаморфизм на глубине. Как мы отмечали, та же идея получила одобрение со стороны многих представителей фенноскандинавской школы. По мнению Седергольма, огромное количество растворов, которое необходимо для регионального метаморфизма крупных масштабов, может получиться только из залегающих ниже эруптивных масс. Современные скандинавы, в особенности Вегман и Баклунд, предполагают, что движение мигматитового фронта ведет к возникновению гранитных пород и проявлению регионального метаморфизма в больших участках земной коры. Большинство геологов, которые работали в мигматитовых областях, видят тесную связь между гранитизацией, мигматизацией и региональным метаморфизмом.

Об этой связи я уже писал ранее довольно подробно<sup>1</sup>, и здесь нет необходимости снова обсуждать этот вопрос во всех подробностях. Я приведу только одну выдержку: «От центрального поля действия грани-

<sup>1</sup> H. H. Read, *Metamorphism and Igneous Action, Pres. Add. Sect. C., Brit. Assoc. Dundee, 1939.*

тизации идут метасоматизирующие растворы, меняющиеся по своему составу и температуре по мере удаления от центра и способствующие образованию около них зон метаморфизма» (стр. 27).

Я делаю вывод, что мигматизация является первопричиной регионального метаморфизма.

На первых страницах этих «Размышлений» мы рассмотрели некоторые стороны учения Ляйеля; мы теперь можем к ним вернуться. Класс первичных или гипогенных пород Ляйеля состоял из двух групп.

1. Стратифицированные породы — такие, как гнейсы, слюдяные сланцы, глинистые сланцы.

2. Нестратифицированные породы — главным образом граниты и близкие к ним породы.

Нестратифицированные первичные породы были названы плутоническими. Ляйель считал, что плутонические породы были образованы действием огня на больших глубинах, и он подкреплял свой взгляд уже рассмотренными нами аргументами (ч. 1). Необходимо помнить, однако, что Ляйель употреблял термин «плутонические» в отношении как процессов, так и пород.

Плутоническая деятельность была названа Ляйелем так «потому, что она, повидимому, имеет развитие в тех районах, где рождаются плутонические породы и при сходных условиях давления и глубины»<sup>1</sup>. Когда мы посмотрим на продукты плутонической деятельности, мы найдем в них ряд интересных вещей. Так, благодаря плутонической деятельности в осадочных породах образуются гранитные нити (threads)<sup>2</sup>; ее следствием могут быть также крупные тела гранитного расплава. Это плутоническое влияние было иногда «такого огромного масштаба, что мы не должны считать, что кристалличность или измененная структура осадочных пород являются следствием близости гранита, а скорее наоборот, что сам гранит, так же как и измененные осадочные породы, приобрел свою кристаллическую структуру в результате плутонической деятельности»<sup>3</sup>. В своем раннем описании метаморфических пород Ляйель говорит:

<sup>1</sup> Elements, 1st. Edit., 18, 1838.

<sup>2</sup> Principles, 4th Edit., 4, 385, 1835.

<sup>3</sup> Elements, 1st. Edit., 19, 1838.

«Метаморфическая теория не требует от нас утверждения, что некоторые прилегающие (contiguous) массы гранита являлись преобразующей силой. Можно просто признать, что процессы, действующие на неизвестных глубинах во внутренних частях земли... аналогичны тем, которые происходят около внедрившихся гранитных масс, поднимавшихся в течение громадных периодов времени с огромной раскаленной поверхности и приводивших осадочные пласты, имеющие тысячи метров мощности, в состояние переплавления, так что при остывании они делались кристаллическими, как гнейсы. Граниты могли быть другим результатом того же самого процесса, соответствующая более интенсивной его стадии, при которой происходило полное плавление; именно этим образом можно объяснить существование переходов между гнейсами и гранитами»<sup>1</sup>.

В сущности такое же утверждение появляется и в 12-м издании «Принципов» в 1875 г. (стр. 139) и его стоит повторить:

«Превращение совершается благодаря влиянию подземного тепла, действующего при огромном давлении, к которому присоединяется термальная вода или пар и другие газы, проникающие в пористые породы. Это дает начало разнообразным реакциям химического разложения и образованию новых соединений. Все эти процессы в совокупности названы «плутоническими», что в одном слове выражает все причины, действующие на больших глубинах в условиях, никогда не существовавших на поверхности. *К этой плутонической деятельности может быть отнесено как плавление самого гранита в недрах земли, так и развитие метаморфической структуры в осадочных пластах.*»

Я выделил курсивом последнюю фразу этой цитаты для того, чтобы подчеркнуть доктрину Ляйеля, что плутоническая деятельность ведет к возникновению как метаморфических, так и гранитных пород. Таким образом, изложенная выше точка зрения, что мигматизация и региональный метаморфизм являются двумя связанными друг с другом процессами, имеет весьма почтенное происхождение. Я держусь того мнения, что в любой схеме классификации горных пород гранитные и метаморфические породы должны быть помещаемы весьма близко друг от друга. Это возврат к Ляйелю, и выделенная, таким образом, составная группа соответствует его «первичной» или «гипогенной» группе. К сожалению, оба эти названия не вполне приемлемы: слово «гипогенный» относится к тому типу терминов, которые мне ничего не говорят,

<sup>1</sup> Elements, Ist., Edit., 251, 1838.

а «первичный» имеет нежелательное для нас сейчас историческое значение. Мы уже видели, что «плутоническая деятельность» Ляйеля обуславливает образование обоих членов его «первичной» группы и в соответствии с этим я предлагаю начать вновь применять термин «плутонический» в этом смысле. Мое первое положение гласит: *существует класс плутонических (plutonic) пород, включающий в себя гранитные и метаморфические породы.*

Для того чтобы обосновать выделение второго класса пород, мы можем теперь опять возвратиться к французской школе. Нужно вспомнить, что Эли де-Бомон ясно себе представлял существование двух в корне различных групп эруптивных пород, одной — гранитной и плутонической и другой — основной, преимущественно вулканической, но включающей в себя также траппы и серпентиниты. Сорок лет спустя Мишель-Леви подчеркнул это различие, указав, что он не может настаивать на отсутствии стратиграфического или петрологического родства между лакколитами, настоящими вулканическими каналами, дайками и силлами, с одной стороны, и гранитными массами — с другой.

Хотя разработка этих взглядов явилась достижением французской школы, нужно помнить, что, как мы уже видели, такое же противопоставление пород вулканических и пород первичных было ранним принципом Ляйеля, хотя, правда, впоследствии этот выдающийся ученый позволил себе попасться на удочку изверженной панацеи. Как я уже излагал в первой части доклада, современная трактовка идеи о коренном различии между вулканическими и плутоническими породами дана в ценной обобщающей работе У. К. Кеннеди<sup>1</sup>. Выдвигаемые Кеннеди две ассоциации — вулканическая и плутоническая — представляют два различных и, повидимому, независимых выражения магматической деятельности. *Вулканическая ассоциация* ведет свое происхождение от универсальной базальтовой магмы и включает в себя не только эффузивные породы, но также все интрузии, связанные с вулканической деятельностью и происходящие

<sup>1</sup> W. Q. Kennedy, *Crustal layers and the origin of magmas*, *Full. Volc. Ser.* 2, 3, 24—32, 1938.

из того же магматического источника. Разнообразие пород ассоциации может получиться благодаря кристаллизационной дифференциации. Как мы уже заметили выше, Ляйель принял, что в большом вулканическом классе пород можно «без сомнения узнать продукты огня, так как они в точности похожи на те породы, которые образуют современные вулканы»<sup>1</sup>.

Имея поддержку Кеннеди, вернемся опять к Ляйелю. Мое второе положение гласит: *существует класс вулканических пород.*

Где теперь употреблять термин «изверженные» (igneous)? Имея в виду, что термин изверженная порода означает породу, затвердевшую целиком из жидкого расплава — магмы, мы теперь обязаны ограничить его употребление. Изверженные породы являются магматическими породами, а последние преимущественно входят в вулканический класс нашей новой классификации. В этом заключается другой возврат к ранним воззрениям Ляйеля, который говорил, что «вулканические породы являются продуктами изверженной (igneous) деятельности»<sup>2</sup>. Небольшая часть моих плутонических пород является весьма вероятно магматическими и, следовательно, изверженными породами, однако прежде чем принять это допущение, в каждом отдельном случае необходимо тщательное изучение. Достаточно вреда было принесено слишком широким и слишком свободным применением термина «изверженный» (igneous). Если можно доказать, что порода застыла из магмы, она является изверженной породой, если нет, то она таковой не является.

Оставшийся класс пород, предложенный Ляйелем и не затронутый моими настоящими рассуждениями, — это его «водный» класс — осадочные породы. Очень жаль, что у нас нет для них хорошего названия, которое было бы подстать вулканическим и плутоническим породам, и я предлагаю для них, с небольшой надеждой на то, что это будет принято, наименование нептунические. *Таким образом, третьим классом пород является нептунический.*

<sup>1</sup> Principles, 3, 10, 1833.

<sup>2</sup> Elements, 1st. Edit., 4—5, 1838.

Теперь мы полностью возвратились к Ляйелю. Существуют три больших класса пород: нептунический, вулканический и плутонический. Я даю следующую формулировку своей позиции:

### ТРИ КЛАССА ПОРОД

1. *Нептунический*. Осадочные породы, преимущественно морские.

2. *Вулканический*. Эффузивы и ассоциирующие с ними интрузивы; преимущественно основные, магматические, изверженные; не орогенные; охватывает общепринятые вулканические породы плюс связанные с ними породы малых интрузий, силлов, лакколлитов и т. д., таких, как габбро, долериты, андезиты, трахиты и т. п.; в этом классе может происходить кристаллизационная дифференциация.

3. *Плутонический*. Два ассоциирующих друг с другом типа: метаморфические породы и ультраметаморфические, мигматитовые, метасоматические, гранитные породы; орогенные; включает породы крупных гранитных комплексов, гнейсы и метаморфические сланцы.

Я представляю эти предложения на ваше рассмотрение. Возможно, что пора героических жестов миновала и лучше предоставить возможность благоразумному человеку остаться спокойным и невозмутимым. Однако вы можете заинтересоваться моими замечаниями и позволите себе изменить, хотя бы и временно, вашу точку зрения на горные породы. Если это произойдет, я буду вознагражден, если этого не случится, я вынужден буду покориться.

Размышления, которыми я с большим удовольствием заполнял свой досуг в течение двух лет, находятся сейчас передо мной. В заключение еще раз прошу читателей, интересующихся предметом моих размышлений, рассматривать обе их части совместно.

## ПРОБЛЕМА ГРАНИТА

R. H. RASTALL  
THE GRANITE PROBLEM*Geological Magazine*, 82, N. 1, 19—30, 1945

Предлагаемая статья имеет своей целью рассмотрение трех президентских обращений проф. Рида. Первое, названное «Метаморфизм и вулканическая деятельность»<sup>1</sup>, было составлено для секции «С» Британской ассоциации в Дунди. Другие два, озаглавленные «Размышления о граните»<sup>2</sup> части I и II, были прочитаны Геологической ассоциации в 1943 и 1944 гг. В дальнейшем для краткости на них будут делаться ссылки, как на «Дунди» и «Гранит I и II».

Президентское обращение обычно имеет и, конечно, должно иметь персональный характер и кажется вполне логичным принять подобный тон при обсуждении затрагиваемых в нем вопросов. Поэтому я не буду извиняться за частое употребление в последующем изложении первого лица, поскольку здесь содержится в значительной степени изложение моих собственных взглядов на современное состояние очень старого вопроса о происхождении гранита и на родственные проблемы, которые, на первый взгляд, кажется, заключают в себе высокоревolutionные идеи. Ясно, однако, из этих обращений (Рида. — *Прим. ред.*), что многие из этих идей не так новы, как думают их авторы. Петрологически я был воспитан в самой строгой секте магматизма, с Розенбушем в качестве его главного пророка. Все изверженные породы, по Розенбушу, образовались из магмы и все плутонические породы были действительными интрузиями, которые освобождали для

---

<sup>1</sup> *Metamorphism and Igneous Action.*

<sup>2</sup> Статья Рида в настоящем сборнике. (*Прим. ред.*)

себя место путем внедрения со стороны или путем приподнимания окружающих пород. Порфириовидные структуры указывали на кристаллизацию в две стадии, и местные изменения состава и ассоциаций родственных типов пород в изверженных комплексах и петрографических областях были следствием магматической дифференциации.

Метаморфизм также резко разделялся на две различных категории — метаморфизм термальный и метаморфизм динамический. Петрологи тогда занимались главным образом описанием новых и интересных разновидностей, которым давались новые названия, причем сильно щелочные типы горных пород являлись особенно популярными, поскольку они представляли хороший материал для введения названий, подобных умптекитам и якупирангитам. Много усилий было также приложено к тому, чтобы разделить все изверженные породы на две большие группы: породы щелочные и породы щелочноземельные или, соответственно, атлантические и тихоокеанские. Наука находилась под сильным немецким влиянием, и французская школа игнорировалась. Американская петрология тогда только возникала.

В элементарном изложении петрологии вопрос классификации всегда представлял особую трудность вследствие отсутствия определенных разграничений между отдельными типами пород. Слабым местом «Петрологии для студентов» Харкера<sup>1</sup> с этой точки зрения было то, что она не содержала в себе детальной классификации, которую можно было бы использовать для чтения перед экзаменами. Главы следуют друг за другом без какого-либо вразумительного объяснения их последовательности. Харкер имел слишком философский склад мышления, чтобы устанавливать твердые и жесткие границы, существования которых он не признавал, но студенты требовали именно этого. Здесь уместно отметить, что я сам создал классификационные таблицы, которые появились в пятом (1909 г.) издании «Петрологии изверженных пород» Хатча<sup>2</sup>, и вполне естественно, что сходный план был

<sup>1</sup> Harker, *Petrology for Students*.

<sup>2</sup> Hatch, *Petrology of the Igneous Rocks*.

использован в моем собственном «Учебнике геологии», написанном совместно с Лейком (1910 г.). Так как обе эти книги имели широкое распространение, многие геологи должны были получить свои первые представления об изверженных породах из них, и я не могу не чувствовать ответственности за распространение того положения, что все граниты произошли непосредственно из интрузивных магм, без какого-либо намека на то, что подобная порода могла образоваться другими путями. Во всяком случае, в течение долгого времени все геологи, которых я знал, считали несомненным, что все граниты были образованы таким образом, т. е. путем кристаллизации интрузивных магм, и что гнейсы были либо результатом течения (flow) гетерогенных магм, либо результатом перекристаллизации под давлением осадочных или вулканических пород, без больших изменений в их составе. В некоторых случаях допускался пневматолиз. Изложенные выше представления являются, конечно, чрезмерно упрощенными, но я думаю, что они точно отражают направление мыслей большинства студентов в конце их университетского курса около 40 лет назад.

Но пока достаточно личных замечаний.

Вернемся к трем обращениям Рида. Гранит I начинается с дискуссии «Что такое гранит?» Здесь цитируются многие современные определения этого понятия и в конце концов дается синтез определений, как обобщение существующих в настоящее время точек зрения. Это достаточно ясно, по моему мнению, может быть сформулировано следующим образом: «Гранит — это глубинная изверженная (или, эруптивная) порода, состоящая из кварца, щелочного полевого шпата и ферро-магнезиального минерала с видимой зернистой гипидиоморфной текстурой». Здесь следует отметить, что континентальные авторы (и проф. Шэнд) употребляют слово «эруптивный», включая сюда и «интрузию», поскольку оно применяется к некоторым теориям образования гранита. Обсуждение этого пункта заставляет предполагать, что английское и американское слово «изверженный» (igneous) подразумевает «однажды расплавленный» (once molten) или что-то подобное этому. Само слово «изверженный» является крайне неподходящим, так как «ignis» означает огонь, но

никто сейчас не предполагает, что сгорание имеет какое-либо отношение даже к происхождению лавы<sup>1</sup>.

Следующий раздел начинается с обсуждения работы четырех британских геологов — двух шотландских и двух английских: Хеттона и Ляйеля, Клифтон Уорда и Грина. Можно принять, что Хеттон был человеком, который в конце концов заставил замолчать школу нептунистов и установил изверженное, т. е. высокотемпературное происхождение гранитов. Его работа так хорошо известна, что не нуждается в критике. Это было действительно первое применение здравого смысла к петрологии изверженных пород и особенно к граниту.

Воззрения Ляйеля, постепенно изменявшиеся в последовательных изданиях его книг, обсуждались достаточно долго; можно сказать, что более ранние их версии были наиболее близки к современности. Он, по крайней мере, допускал возможность образования гранитов путем метаморфизма в самом широком смысле этого слова. Так как к изложению этих идей с особым вниманием Рид возвращается в конце «Гранита II», рассмотрение их на этот раз может быть отложено. Приятно найти полное обсуждение работы Клифтон Уорда в Озерном районе, которой в прошлом уделяли мало внимания. Я впервые познакомился с этой работой приблизительно в 1904 г., и если она в это время и не произвела на меня особенного впечатления, то по крайней мере открыла мои глаза на то, что некоторые компетентные авторы могут допускать объяснение происхождения гранитов метаморфическим путем. Цитируем из «Гранита I», стр. 70: «В своих исследованиях гранитов Озерного района Уорд выдвигает идеи, которые, будучи обогащены немного современной терминологией и изложены физико-химическим языком, приближаются к наиболее революционным идеям сегодняшнего дня». Он говорит, что граниты Эксдаля и Шэпа произошли в большей части случаев в результате сильнейшего метаморфизма вулканических пород Борроудейля. С другой стороны, гранит Скиддоу, вероятно, образовался на огромной глубине, откуда он поднялся

<sup>1</sup> См. примечание к статье Рида в настоящем сборнике, стр. 147. (Прим ред.)

наверх. Это представление возникло вследствие того, что трудно было допустить, чтобы гранит мог образоваться из сланцев Скиддоу. И действительно, гранит Скиддоу не мог быть прямо образован из сланцев Скиддоу. В редко посещаемых больших обнажениях в верхней части долины Кельдью (лес Скиддоу) гранит ясно перекрывается песчанистыми породами очень значительной мощности; только в более мелких апофизах, на которые было обращено наибольшее внимание, гранит приходит в прямой контакт со сланцами. Более того, в скиддавианской серии, как показали современные исследования, имеются огромные массы грубозернистых песчаников «the Watch Hill», превосходно «приспособленных» для переплавления в гранит. Кроме того, скиддавианские слои должны покониться или на инглетонианских породах, или на архейских. Следует подчеркнуть также, что имеется значительная разница между мусковит-содержащими очень кислыми гранитами Скиддоу и породами Шэпа, которые богаты биотитом, имеют только 68%  $\text{SiO}_2$  и обычно описываются, как адаммелиты или гранодиориты. Обе эти породы будут упоминаться далее.

Уорд отчетливо признал возможность добавления материала снизу при образовании гранита и насчитал три различных состояния, при которых породы подвергаются метаморфизму. Коротко эти состояния можно изложить так: 1) изверженный расплав; 2) водноизверженный расплав не выше красного каления; 3) пропитывание водой при  $t^\circ$  значительно ниже красного каления. Примером первого условия является расплавленная лава и то, что назвали бы теперь сухим расплавом. Второе и третье условия отвечают современному понятию гидротермальный.

При обсуждении статьи Уорда Джедд указал, что наблюдаемые отношения могут привести к совершенно другим заключениям.

Грин различает три типа гранита, которые наиболее кратко могут быть охарактеризованы следующим образом:

1. Полосчатый (banded) гранит, обязанный своему происхождению умеренному метаморфизму слоистых пород.

2. Гранит в аморфных массах, как он его называет, очевидно, представляющий массы без четких границ, — результат более высокой степени метаморфизма, чем «Гранит I», но не достигший плавления.

3. Несомненно интрузивный гранит, метаморфизованный до точки плавления.

Грин использует слово метаморфизм в каждом из этих трех определений, подразумевая здесь жидкое состояние (магму, хотя это слово и не используется), как результат плавления при высокой температуре (и давлении?) существовавших до этого пород. Это в значительной степени повторяет воззрения Уорда.

Следует отметить, что Грин не определяет, какой тип пород дает при плавлении гранитную магму, в то время как по Уорду — ее может дать почти любая порода. Некоторые высказывания на недавнем обсуждении в Геологическом обществе вопроса о части берегового батолита Британской Колумбии звучат очень схоже со всем этим, хотя в этой дискуссии «магическим словом» является большей частью гранодиорит, а не гранит. В другом месте Грин определенно говорит, что некоторые граниты являются плутоническими, а некоторые метаморфическими.

Целью рассмотрения работ, принадлежащих к так называемой «школе Озерного района» (по Риду), является стремление показать, что в сравнительно недавнее время в Англии и за ее пределами имелись геологи, верившие в то, что граниты могли образоваться путем изменения ранее существовавших пород. Полосчатость Грина, очевидно, наводит на мысль об осадочных породах, и Уорд подробно рассматривает, как гранит мог быть образован из сланцев Скиддоу путем «добавления из глубины некоторых из тех элементов, которые отсутствовали в первичном сланце».

Очевидно, невозможно дать здесь полный отчет об идеях французской школы, да это и необязательно, поскольку в «Граните II» проф. Рид достаточно ярко их суммирует, делая упор на историческом 1847 г., отмеченном появлением в печати нескольких, делающих эпоху, работ. Петрологи не могли лучше отпраздновать освобо-

ждение Франции от германской тирании, как чтением этой литературы и свободным ее обсуждением<sup>1</sup>.

Еще в 1824 г. Ами Буэ выдвинул идеи, тесно примыкающие к концепции гранитизации в ее современном понимании, а в 1837 г. Фурне пришел к заключению, что породы, очень сильно похожие друг на друга, например гнейсы, могут иметь различное происхождение, т. е. к выводу очень важному с современной точки зрения.

К 1841 г. относится появление плодотворной идеи Сен-Клер-Девилля о минерализующих агентах; эта идея в статье совместно с Эли де-Бомоном шестью годами позже дала начало всему современному учению о пневматолитизации и теории рудных месторождений.

Позже Мишель-Леви, Лакруа, Барруа, Дюпарк и Термье выдвинули новые взгляды, диаметрально противоположные идеям германской школы, пользовавшимся большим распространением в Англии и в Америке. Одна из наиболее фундаментальных из этих новых доктрин может быть выражена словом «гранитизация»; уместно будет здесь разъяснить, что подразумевают под этим выражением. Приводим синтетическое определение проф. Рида, полученное из анализа многих источников.

«Гранитизация означает процесс, при котором затвердевшие породы превращаются в породы гранитного характера, не проходя через магматическую стадию».

Ясно, что все это открывает огромное поле для дискуссии, поскольку французская школа и многие авторы в других странах утверждают, что граниты могут образоваться из большого разнообразия пород. Во многих обсуждениях один вопрос часто остается не вполне ясным, а именно — в какой мере породы, обычно называемые гнейсами, должны включаться в категорию гранитов. На самом деле, почти все граниты, даже наиболее однообразные (uniform), обнаруживают более или менее параллельную структуру, если изучаемый образец достаточно велик. Обычные образцы пород из кабинетных коллекций часто вводят в этом отношении в заблуждение. Иногда требуется просмотреть целую каменоломню или утес, чтобы

---

<sup>1</sup> Эта фраза была написана в день освобождения Парижа, 26 августа 1944 г. (Прим. авт.)

обнаружить текстуру породы. Параллельная структура очень часто рассматривается как результат течения при внедрении интрузии или действия конвекционных потоков в магме, или приписывается условиям, при которых можно говорить о смесимости магм. Получается так, что действительное различие между орто- и парагнейсами как бы начинает теряться.

Нам представляется, что наименее удовлетворительной частью всех этих суждений об эманациях, минерализующих флюидах и прочих остаточных веществах является то, что мы не можем решить, откуда они появились. Невольно напрашивается один вывод: поскольку эти флюиды могут превратить почти все в гранит, постольку их собственный состав должен, вероятно, быть подобен гранитному, и поэтому они могли подниматься из нижней части сиала. Следует отметить, что некоторые французские авторы используют термин фельдшпатизация почти как синоним гранитизации.

После всего сказанного нет, в конце концов, ничего «мистического» в фельдшпатизации, если применять законы физической химии. Полевой шпат является устойчивой фазой в целом ряде систем, состоящих из компонентов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и щелочей, при высоких температурах и давлениях, и поэтому он может кристаллизоваться почти в любой обстановке. Это позволяет преодолеть трудности, возникающие иногда при объяснении образования полевого шпата как в породах изверженных, так и в метаморфизованных осадках. Если содержание щелочей и кремнекислоты достаточно высокое, результатом является кварц и полевой шпат.

Здесь, однако, можно задаться вопросом: имеются ли вообще настоящие граниты без мусковита? Существуют же богатые натрием породы, с высоким содержанием кремнекислоты, содержащие арфведсонит, эгирин и т. д. Такие ассоциации в рассматриваемых нами работах не получают объяснения; поскольку, например, в районе Осло, однако, имеется хорошо установленная зависимость между этими ассоциациями и сильно щелочными средними и основными породами, вопрос этот, очевидно, требует рассмотрения. Отношение таких групп к проблеме магматической дифференциации очевидно.

Другим негранитным типом пород, который встречается в некоторых местах в очень крупных массах, является анортозит. Последний состоит главным образом из плагиоклаза и поэтому как будто не представляет трудности для фельдшпатизации; однако многие из более основных типов анортозитов обнаруживают настолько тесную связь с более нормальными (т. е. более легко классифицируемыми) типами пород, подобными габбро и эвкриту, что трудно решить, где здесь должны остановиться пылкие «гранитизаторы».

Мы не предполагаем здесь входить в обсуждение вопроса о различных видах метаморфизма, вопроса, настолько запутанного теперь в связи с гранитной проблемой. До некоторой степени — это вопрос номенклатуры, возникающий из стремления добиться большей точности и возможно являющийся следствием недостаточно ясных определений, даваемых различными авторами. Если гранит образовался путем изменения более древних пород, то более точное название процесса, вызвавшего эти изменения, не имеет большого значения. Откровенно говоря, я чувствую значительное затруднение, когда я хочу представить себе какой-либо процесс, при помощи которого более высшая степень метаморфизма может быть перекрыта более низкой степенью, как об этом неоднократно писал Рид. Не имеется, конечно, никакого сомнения относительно точности наблюдения, но я просто констатирую, что не могу представить, как это происходит.

Однако то, что нас сейчас интересует, — это вопрос, могут ли породы различного вида быть превращены в гранит под действием того, что мы можем называть для удобства минерализующими агентами. Это косвенным образом затрагивает и то, что можно было бы назвать проблемой пространства. В течение многих лет меня занимала эта проблема, в особенности в отношении огромных батолитов. В некоторых случаях это затруднение было обойдено утверждением, что это не настоящие батолиты, в смысле бездонной массы, а плоские слои (sheets), лишь внешне сходные с батолитами. Но это объяснение не применимо к наиболее крупным телам. В этих случаях единственным возможным объяснением является, повидимому, то, что гранитная масса (в широ-

ком смысле слова) становится по направлению книзу все более и более широкой и, в конце концов, сливается на глубине с сналем.

Мне кажется, что одной из главных точек зрения более ранней французской школы является то соображение, что между плутоническими и метаморфическими породами, как их обычно определяют, реального различия нет; во всяком случае это относится к кислым членам — к гранитам и гранитогнейсам.

Согласно французским авторам, как это вытекает из всей литературы, гранитизация более древних пород сопровождается двумя главными процессами, которые могут быть удобно обозначены, как послойная (*lit-par-lit*) инъекция и полное замещение минералов (но не обязательно всех), путем чисто химического взаимодействия. Послойная инъекция необходимо предполагает, что первоначально должен существовать некоторый вид полосчатой структуры в виде осадочного напластования, кливажа или сланцеватости. Внесение нового материала может выразиться в двух формах: либо насильственная инъекция вдоль ослабленных плоскостей, приводящая без химического воздействия к возрастанию общего объема породы, либо удаление путем растворения и замещения некоторых наиболее восприимчивых слоев, не влекущее за собою изменения общего объема.

Но наряду с этим имеется возможность химического замещения некоторых или всех минералов породы проникающими агентами, в широком смысле слова. Совершенно несущественно, называются ли последние парами, флюидами или жидкостями, так как процессы почти несомненно протекают при температурах выше критической точки воды, около  $375^{\circ}\text{C}$  и при давлении (грубо) около 200 ат. Эта температура является, очевидно, температурой красного каления и необходимое давление достигается на совсем небольшой глубине. Довольно любопытно, что во всех этих рассуждениях о критической точке никогда не упоминается. Много лет назад Аррениус указал, что вода при высоких температурах становится мощным химическим фактором. Теперь для нас ясно, что если материал должен быть добавлен к породам путем молекулярного замещения, то что-то должно быть

удалено, и современная литература по этому вопросу дает бесконечные примеры, с анализами и подсчетами. Но после всего этого все же остается неясным, почему так часто, можно сказать почти всегда, результатом этих процессов является гранит.

Процессы, при которых породы гранитизируются, описываются французскими авторами как пропитывание (*imbibition*), механизм масляного пятна и т. д.

Мы теперь незаметно подошли к главному «ключевому» (*key*) слову современной литературы — «мигма». Буквальное значение этого слова — смесь, и в обычном представлении под ним, видимо, подразумевается смесь магмы и продуктов разрушения или расплавления ранее существовавших пород. Однако некоторые авторы, особенно Ниггли, считают, что участие магмы не обязательно, потому что жидкая часть может быть получена из ранее существовавших пород. Так, по крайней мере, я его понимаю; но, однако, при этом неясно, почему этот материал должен рассматриваться как смесь. Основной мыслью является, повидимому, то, что порода имеет пятнистый (*patchy*) вид и может быть пронизана жилами, образованными за счет концентрации отдельных составных частей самой породы. Определение мигматитов, данное Седергольмом в 1926 г., заключается в том, что они представляют собой по внешнему виду смешанные породы и происходят путем смешения ранее существовавших пород с позднее внедрившейся гранитной магмой. Литература о мигматитах, включающая очень оживленную полемику между Седергольмом, Холмквистом, Вегманом, Ниггли, Баклундом и Экерманом, теперь весьма обширна и не может быть здесь рассмотрена подробно; в этой полемике проблема гранитов рапакиви и содержащихся в них крупных полевошпатовых выделений играет, в общем, значительную роль. К этому последнему пункту мы вернемся позднее.

Поскольку петрология древних пород, образующих часть Фенноскандинавского щита, играет такую значительную роль во всем этом вопросе, я считаю возможным отметить здесь обстоятельство, которое, как давно мне кажется, имеет огромную важность, именно — более сильную изверженную и метаморфическую деятельность

в архейское время, по сравнению с каким-либо более поздним временем. Я припоминаю, как презирали геологов, например проф. Боннея, за проявленный ими скептицизм в отношении образования настоящих гнейсов в постархейское время. Возможно, эти геологи шли слишком далеко в этом, но все же они, повидимому, были ближе к истине, так как действительно имеется коренное различие между метаморфическими и особенно гранитными породами архея и такими же породами более поздних революционных эпох. Во многих современных статьях общего характера имеется определенное стремление подчеркнуть различие между древними континентальными глыбами, с одной стороны, и геосинклиналями и шельфовыми областями — с другой. Приятно констатировать, что проф. Дэли по крайней мере не относится враждебно к идее большей активности в архейское время. В применении принципа однообразности мы, вероятно, зашли слишком далеко, и я думаю даже, что Ляйель не протестовал бы против некоторого его ослабления.

Как только что упоминалось, за последние годы проблеме вкрапленников полевых шпатов уделялось большое внимание. Я совершенно не компетентен, чтобы касаться проблемы рапакиви, так как не знаком с литературой и видел очень мало образцов, но имеются два примера, упомянутые проф. Ридом, которые я сам видел и по которым мне хотелось бы сделать некоторые замечания. Впервые, в 1910 г. Роджерс и Дю-Тойт показали мне знаменитый разрез в Sea Point, Capetown (разрез Дарвина, см. иллюстрацию в «Геологии Южной Африки» Дю-Тойта<sup>1</sup>) и, коротко говоря, в течение всей моей жизни я не мог понять, каким образом эти полевые шпаты могли получиться в породах Малмсбери в готовом виде. Действительно, то, что я видел, впервые поколебало мою веру в абсолютную доктрину интрузивного магматического происхождения гранита. Другой пункт касается крупных красных полевых шпатов в граните Шэп (Shap) и темных округленных основных пятен, приписываемых Харкером и Марром захвату материала из более основной нижележащей магмы. Профессор Рид, насколько я его понимаю,

<sup>1</sup> Du Toit, Geology of South Africa.

считает, что эти «комки» (clots), так же как и явные ксенолиты, представляют собой различные стадии изменения окружающих пород и что красные кристаллы ортоклаза росли в них. Мое возражение заключается в том, что полевые шпаты в округленных комках всегда глубоко корродированы и окружены реакционными зонами, иногда почти исчезающими, и сходны с такими же зернами в прилегающих основных дайках. Я не решаюсь дать объяснение этому явлению, но я считаю, что оно должно быть рассмотрено в свете законов, контролирующих устойчивость минералов. Сверх того, согласно всему моему опыту, во всяком достаточно большом обнажении нормального гранита можно отметить определенную тенденцию в расположении фенокристаллов — в виде течения. Здесь опять отдельно взятые образцы могут ввести в заблуждение и привести к неправильным заключениям. Другими объектами в граните ШЭп, которые требуют дальнейшего исследования, являются андалузитсодержащие породы, а также общее положение полосчатости в восточной части гранитного массива, оба вопроса, отмеченные Харкером и Марром.

Но вернемся к мигматитам и к общей проблеме гранитизации в широком смысле. Основная идея сводится здесь к следующему: породы, которые когда-то были, вероятно, в твердом и устойчивом состоянии, были так изменены действием физических или химических агентов, что снова стали неустойчивыми и были либо механически раздроблены, либо так сильно нагреты и подверглись действию таких сильных химических агентов, что их состав претерпел изменение. Нагрев повышается почти до температуры плавления, и породы иногда перекристаллизуются с образованием новых форм и структур. К этим процессам с их вариантами применяются многие специальные названия. Не лишним будет кратко рассмотреть их. Следующие определения взяты из работы Холмса, 1920 г.<sup>1</sup>, где они приводятся со ссылками на работу Седергольма 1907 г.

*Анатексис* — ультраметаморфический процесс, при котором глубинные породы переплавляются горячими

<sup>1</sup> A. Holmes, Nomenclature of Petrology.

эманациями и горячими газами, поступающими снизу; таким образом предусматривается образование магмы на месте.

*Палингенез* — зарождение магмы *in situ* путем плавления ранее существовавших пород, таких, как граниты, гнейсы и кристаллические сланцы.

Оба определения кажутся идентичными, и Рид указывает, что «палингенез» должен быть отброшен. Очевидно, что нет необходимости в обоих терминах, хотя мне и кажется предпочтительнее второй из них.

К этим терминам может быть прибавлен *синтексис*, введенный Левинсон-Лессингом в 1896 г.; этот термин кратко означает смешанный расплав, в то время как анатексис предполагает расплав какой-либо одной породы. Разница кажется несущественной. В том же источнике у Харкера мы находим и первоначальное данное Седергольмом определение мигматита: этот термин прилагается к сложным породам, таким, как гнейсы, образовавшимся путем инъекции гранитной магмы между слоями сланцеватых пород. Очевидно, что термин мигматит со временем изменил свое значение, так как это первоначальное определение эквивалентно послойной инъекции (*lit-par-lit*), т. е. имеет смысл более узкий, чем современное определение мигматита. В нем также не упоминается об ихоре, а говорится лишь о магме и нет определенных указаний на химические изменения или метасоматическое замещение. Более позднее седергольмовское определение мигматита было дано выше. Остается не вполне ясным, что же именно теперь понимается под словом мигматит.

Другой момент, нуждающийся в освещении, заключается в том, являются ли идентичными фенноскандинавские и французские представления о гранитной магме. Более ранние французские авторы не применяли это выражение, но более поздние, особенно Лакруа и Термье, его употребляют. Насколько мне представляется, во французском понимании магма образуется сама при продвижении, иначе говоря, образуется путем воздействия того, что они называют эманациями на существовавшие ранее породы (фильтрующие колонны; серия трансформирую-

щих эманаций и т. п., что отвечает ихору Седергольма). Но определения, цитированные выше, повидимому, предполагают вполне готовую магму, которая приходит из некоторого, остающегося без объяснения источника и производит работу, приписываемую французами эманациям. Одно соображение представляется здесь существенным: если первичная порода очень отличается от гранита, простое добавление магмы гранитного состава не может превратить ее целиком в гранит. Там должно присутствовать нечто для уравнивания негранитной фракции. В связи с этим возникает вопрос — почему результатом всегда является гранит? Седергольм определенно указал, что мигматитов основного состава не существует. Таким образом, очевидно, амфиболиты должны быть исключены из этой категории.

Некоторые авторы, включая проф. Рида, почти с сожалением констатировали, что хотя осадки в геосинклиналях были, очевидно, опущены на огромные глубины, они не стали метаморфическими породами и не расплавились до гранитной или какой-либо другой магмы. Я не вполне убежден в правильности этого. Возьмем один локальный пример. Проф. О. Т. Джонс показал, что мощность осадков, отложившихся в нижнепалеозойской геосинклинали Англии, выражается цифрой порядка 13,5 км. Каждый знает, что породы нижнего кембрия Северного Уэльса интенсивно раздроблены, но не метаморфизованы. Однако лейнстерский гранитный массив имеет 112 км в длину и более полутора десятков километров в ширину, представляя собой типичный батолит. Очень похожие граниты имеются на острове Мэн, в Скиддоу, вдоль той же линии простирания. Более того, теперь известно, что сланцы Скиддоу протягиваются на много километров к юго-западу, гораздо дальше, чем это показано на карте Уорда. Я предлагаю в таком случае считать, принимая доктрину палингенеза, что эти граниты представляют собой результат плавления основания этой огромной геосинклинали, происшедшего, вероятно, при участии эманаций, поднимавшихся снизу, как ранее предполагалось Уордом. Гранитные образования в ядрах других складчатых цепей могли произойти таким же самым образом.

Другим вопросом, на который петрологи обычно обращают мало внимания, вопреки его несомненной важности, в связи с рассматриваемой проблемой является крайне капризное распределение рудных месторождений, связанных с гранитами. Ассоциация олова и вольфрама с турмалиновыми гранитами достаточно очевидна и связывается с летучими фторидами, заключающими атомы олова и вольфрама, но непонятно то, почему эта ассоциация встречается в Западной Европе только с герцинскими гранитами, в районе Малайи — с позднемезозойскими, возможно, меловыми, а в Боливии, — вероятно, с третичными. Известная последовательность металлоносных зон вокруг гранитных куполов, в соответствии с понижающимся температурным градиентом, как в Корнуэлле, также может быть понятна на основании данных физической химии, при условии, однако, если элементы располагаются в определенном порядке. В Корнуэлле две золото-серебряные зоны могут выпадать и ряд вдруг заканчивается ртутью — самой низкотемпературной рудой, которая часто отлагается горячими источниками в вулканических районах. Источник всех этих металлов неизвестен. Они не могут происходить из гипотетической сульфидно-окисной зоны ниже «симы», так как тогда они ассоциировали бы с базальтом, а не с гранитом, а олово всегда идет с кислыми породами. Другие элементы той же ассоциации — молибден и висмут; часто также присутствует много мышьяка. Основным вопросом, однако, является здесь не характер минеральных групп, а тот факт, что металлогенезис ассоциируется с гранитом также спорадически без всякого порядка (*show neither rhyme nor reason*). Этим вопросом я занимался много, но никогда не получал удовлетворения. Имеются, как известно, такие же строго определенные минеральные ассоциации с основными породами, например платины и хрома с серпентинитами, но здесь рассматривать мы их не будем. Однако эта тема имеет большое экономическое значение как основание для научного проспектирования и вполне достойна изучения.

Из многочисленных интересных тем, которые затронуты в этих трех обращениях (Рида), только одна еще будет рассмотрена в настоящей статье: это теория проис-

хождения гранитной магмы из базальтовой, которая, кажется, особенно раздражающим образом действует на проф. Рида. Мои замечания по этому поводу заключаются в том, что для образования батолита главной цепи Малайского полуострова, который имеет 480 км в длину и 64 км в ширину в Пераке и образует горы до 2,1 км высотой, потребовался бы огромный объем базальта. Любопытно указать, что крошечные участки кровли продолжают существовать на вершинах двух высочайших пиков страны. Имеется несколько других больших и параллельных гранитных хребтов, но главный горный хребет выбран нами потому, что в нем развиты очень кислые порфирировидные породы с мусковитом, биотитом, большим содержанием турмалина и олова, весьма похожие на некоторые граниты Корнуэлла. Поэтому для образования гранита по теории дифференциации потребовалось бы наибольшее возможное количество базальта. Согласно подсчетам Гроута это количество должно было бы иметь в 20 раз больший объем, чем объем гранитов. Откровенно говоря, я теперь не вижу необходимости во всем этом шуме (fuss) вокруг дифференциации. Каждый согласен с существованием сиала и симы, которые должны были разделиться еще в очень ранние дни истории земли, до того как образовалась какая-либо подобная кора. С этой точки зрения гранит и базальт являются оба дифференциатами из одного общего источника, но это не то же самое, что дифференциация гранита из базальта.

Из беспристрастного рассмотрения всего вопроса о происхождении гранита, разобранных в обсужденных здесь работах, вытекают некоторые совершенно определенные заключения.

Прежде всего, и, вероятно, самым важным является то обстоятельство, что одно единственное объяснение не будет пригодно для всех случаев; говоря словами Грина, «имеются граниты и граниты». Можно различать, вероятно, по меньшей мере, три категории гранитов:

а) Огромные, обычно гнейсированные гранитные массы архейских щитов и древних континентальных блоков.

б) То, что можно назвать ядерными батолитами в складчатых хребтах более поздних революционных периодов.

в) Мелкие гранитные интрузии, включающие дайки, жилы и жилы, любого возраста.

Рассмотрим эти категории подробнее.

а) В отношении первой категории нужно сказать, что здесь во всей силе возникает проблема пространства. Если все эти гигантские массы рассматривать, как имеющие строго интрузивное происхождение при любых условиях, т. е. как образовавшиеся путем добавления нового материала к существовавшим до этого породам, то положение становится несостоятельным. Даже если мы оставим в стороне данные, касающиеся их состава и структуры, нам становится ясно, что они могли образоваться только путем изменения ранее существовавших пород с небольшим добавлением материала или без него. Когда же все другие — структурные, минералогические и химические — данные принимаются во внимание, вывод становится неопровержимым: такие граниты никогда не существовали в состоянии, которое может быть названо жидким; другими словами, они не были образованы путем интрузии и кристаллизации магмы соответствующего состава. Можно, конечно, возразить, что это несомненно в случае ясно выраженных гнейсов, однако не все граниты гнейсовидны. Ответом является то, что между этими образованиями существует так много переходных форм, что эта концепция может быть приложена к любой из них.

б) Объяснение способа образования ядерных батолитов снова включает проблему объема (пространства). Можно указать, что здесь имеет место некоторая неправильность в наших представлениях, как это часто бывает и в других геологических вопросах, вызванная вычерчиванием разрезов с сильно преувеличенным вертикальным масштабом, что создает впечатление о наличии поднятий огромных размеров. Напомним вышеприведенный случай батолита главного хребта Малайи, где нам известна высота кровли и где крутизна склона выражается углом около  $4^\circ$ ; несомненно, есть много других подобных же случаев. Представляется очень

вероятным, что такие массы были образованы в процессе расплавления или при какой-либо другой форме активизации дна геосинклинали, приведшей к обычному типу гранитизации, вопреки многим указаниям, что такой процесс не встречается. Здесь подъем гранитизирующих агентов, вероятно, облегчается складчатостью.

в) Остается еще обширный класс малых интрузий гранитного состава, которые, видимо, являются следствием действительного внедрения жидкого материала вдоль ослабленных плоскостей. Это вызывает мало сомнения в отношении даек и жил, но следует напомнить, что многие из этих инъекций были, конечно, особенно богаты летучими составными частями и оставались жидкими до очень низких температур. Труднее обстоит дело в отношении гранитных масс промежуточного объема, — меньших, чем батолиты, но больших, чем дайки и силлы, — таких, как лакколлиты, если таковые существуют. Здесь лучше пока воздержаться от суждений. Имеются очень трудные случаи, наглядным примером которых может служить гранит Шэп.

Следует добавить несколько слов относительно того, какой в нашем представлении является магма. Наиболее распространенный взгляд, повидимому, сводится к тому, что это — жидкость, состоящая главным образом из силикатов, но с некоторым количеством летучих составных частей, особенно воды, которые помогают удерживать ее в мобильном состоянии. Более современной концепцией является, однако, то, что магма больше всего похожа на молочный рисовый пуддинг — род смеси из кристаллов и жидкости. Это, вероятно, отвечает первоначальному смыслу этого слова. Теперь к ней, очевидно, трудно будет приложить законы для растворов, многие из которых разработаны только для разбавленных растворов. Но здесь нужно указать, что этот тип *магмы* не сильно отличается от общепринятой концепции *мигмы*. Самым слабым местом общепринятого взгляда на магму является, однако, то, что никто никогда не может сказать, откуда она появилась и почему она появилась вообще.

Когда мы пытаемся рассмотреть истинную природу

процессов, предположительно ведущих к образованию гранитных пород, включая гнейсы, то мы видим, что французские теории действительно признают метасоматизм и пневматолитиз в очень широком масштабе, без какого-либо вовлечения настоящей магмы и без какого-либо указания на полное плавление, в то время как фенноскандинавская школа как будто указывает на некоторое участие жидкой магмы в добавление к плавлению, хотя Седергольм однажды сказал, что он представляет скорее растворение, чем плавление, другими словами — гидротермальный процесс. Можно было бы сказать, что наиболее современная концепция мигматизации является до некоторой степени компромиссом между этими двумя школами.

На первой странице этого обзора было сказано, что взгляды Ляйеля будут упомянуты снова. Это объясняется тем, что последний раздел «Гранита II», представляющий обобщение выводов автора, озаглавлен: «Возвращение к Ляйелю». На воззрениях Ляйеля сказывалось сильное влияние французской школы, что вполне естественно, так как он был хорошо знаком со многими ведущими геологами этой страны, и ясно, что он рассматривал образование гранита и региональный метаморфизм как единое целое. Действительно, он говорит о плутонизме так же, как о плутонических породах. Этот вопрос рассматривается довольно обстоятельно в обращении «Дунди», и из этого рассмотрения проф. Рид заключает, что мигматизация является первопричиной регионального метаморфизма. В качестве пояснения к этим словам я добавил бы, что в мои, давно прошедшие студенческие дни нам определенно говорили, что полное плавление исключено из сферы метаморфизма. Это исключило бы образование гранита путем палингенеза из категории метаморфических процессов; однако этот процесс не мог быть отнесен и к категории процессов интрузивных, отличительной чертой которых является внедрение, интрузия. Здесь возникает трудно разрешимая дилемма. Я сильно сомневаюсь, говорил ли когда-либо или подумал ли Ляйель, предложивший слово «метаморфизм», что плавление при этом было исключено из его сферы.

Суммирую вышесказанное: из беспристрастного рассмотрения трех обращений Рида и цитат, содержащихся в них, представляется, что общепринятая концепция образования гранитов путем интрузии и кристаллизации жидкой магмы вместе со взглядом на образование гнейсов только путем регионального метаморфизма окружающих пород, без изменения их состава, является неприемлемой, по крайней мере в широком масштабе и в особенности для пород архейского фундамента. Рассмотренные здесь процессы, как бы мы их ни называли, повидимому, дают более удовлетворительное объяснение, хотя интрузия магмы в небольшом масштабе ими и не исключается. Главная трудность, по нашему мнению, заключается в объяснении первопричины всех этих процессов и в объяснении постоянного возобновления плутонической активности в периоды диастозизма. Ответ, возможно, будет найден в приложении к сценарию теории Джоли о накоплении энергии в форме скрытого тепла в результате радиоактивного распада.

Х. БАКЛУНД

## ПРОБЛЕМА ГРАНИТИЗАЦИИ

H. G. BACKLUND

THE GRANITIZATION PROBLEM

*Geological Magazine*, 83, No 3, 105—117, 1946

Ценный доклад профессора Рида (H. H. Read), озаглавленный «Размышления о гранитах», первая и вторая части которого были прочитаны Ассоциации геологов в 1943 и 1944 гг.<sup>1</sup>, вызвал большой интерес в петрологических кругах. Это произошло особенно потому, что эти «мысли» направлены против основных, ныне существующих идей, возникших в ходе исторического развития петрологии в течение последних полутора столетий.

«Размышления» профессора Рида особенно интересны потому, что привели его к заключениям, диаметрально противоположным тем, которые были высказаны профессором П. Ниггли в докладе на февральском заседании Цюрихского геологического общества в 1942 г., несмотря на то, что оба автора основываются почти на той же серии исторических «доказательств».

Существенно, что профессор Артур Холмс (Arthur Holmes) недавно (1945<sup>1</sup>) в небольшом обзоре, посвященном разбору представлений о гранитизации, подчеркнул существование того факта, что миграция элементов или их окислов действительно происходит в твердом веществе. Для процессов, совершающихся в *малых масштабах*, такая миграция была доказана Холмсом (1936, 1945<sup>1</sup>) и другими исследователями — Адамсом (Adams, 1930), Хедволем (Hedvall, 1938), а то, что подобные процессы происходят в *средних масшта-*

<sup>1</sup> Статья Рида в настоящем сборнике. (Прим. ред.)

бах, показала Д. Л. Рейнольдс (D. L. Reynolds, 1936, 1941, 1942, 1943, 1944) в ряде фундаментальных исследований. Однако существуют серьезные сомнения в возможности приложения этих фактов для объяснения явлений *крупных* и *очень крупных* масштабов; при этом забывается, что все точные цифровые, аналитические и синтетические данные петрологии и геологии до сих пор были получены при изучении явлений именно в малых масштабах. Возникает вопрос, могут ли микроскопические исследования иметь вообще применение в петрологии, если будет отброшена возможность экстраполяции от *малых масштабов* (лабораторные опыты) через *средние масштабы* к *крупным* и *очень крупным* масштабам. Здесь следует вспомнить знаменитого французского геолога Пьера Термье, который при рождении теории покровов («парре») около сорока лет назад бросил следующую реплику по поводу сомнений и возражений, которые поднялись против далеко перемещающихся покровов: «Это не первый километр, который они проходят».

При чтении исторического обзора профессора Рида, который был позже сжато изложен и до некоторой степени дополнен доктором Р. Х. Рестоаллом (R. H. Rastall, 1945)<sup>1</sup>, возникает вопрос, почему Клифтон Уорд (Clifton Ward) и А. Х. Грин (A. H. Green), эти превосходные исследователи, не имели непосредственных продолжателей среди британских петрографов. И почему последователи французской школы 1847 г. — крупнейшие петрографы восьмидесятых и девяностых годов — А. Мишель-Леви (A. Michel-Lévy), П. Термье, Ш. Барруа (Ch. Barrois), А. Лакруа (A. Lacroix), создатели теорий «масляного пятна» (*tâche d'huile*) и «фильтрующих колонн» (*colonnes filtrante*), иллюстрирующих процессы гранитизации, после начала текущего столетия умолкли перед «оркестровым кресчендо» дискуссий, относящихся к магматической дифференциации, теории, которая к этому времени начала претендовать на значение единственной причины образования гранитных (и ортогнейсовых) пород. Так продолжалось до 1937 г., когда алжирские последователи знаменитой французской школы (Р. Перрен

<sup>1</sup> Статья Рестоалла в настоящем сборнике. (Прим. ред.)

и М. Рубо, R. Perrin et M. Roubaut, 1937, 1939) снова начали развивать классические французские идеи.

Что же произошло за это время? Дальнейшее развитие концепции гранитизации было, несомненно, замедлено не только благодаря триумфальному шествию всеобъясняющей теории кристаллизационной дифференциации (наиболее горячие приверженцы которой теперь, повидимому, совершенно забыли, что их теория является экстраполяцией точных результатов, полученных исключительно из экспериментов *малого масштаба*), но также вследствие отсутствия в Центральной Европе достаточно крупных и непрерывных обнажений, которые были бы пригодны для регионального изучения этих явлений в крупных масштабах. Такие обнажения необходимы для детального прослеживания геологических взаимоотношений и последовательного изучения различных «переходных» типов горных пород, рассмотрение критических текстур и состава которых вносит много ясности в разрешение вопросов петрогенезиса. Такие непрерывные обнажения, свободные от элювия, почвы и растительного покрова, в которых выходит гладкая поверхность невыветрелых пород, встречаются только в отдаленных и малонаселенных странах, лишь в сравнительно недавнее время обнажившихся благодаря четвертичным оледенениям. Вымытые морем гладкие берега, образовавшиеся в результате векового поднятия Балтийского побережья Фенноскандии, восточного и западного побережья Гренландии и Лабрадора, создают наилучшие условия для подобного рода изучения. Неудивительно, таким образом, что после того, как ведущие французские геологи обратили свое внимание на другие проблемы, как, например, на развитие теории покровных надвигов, центр изучения гранитизации переместился в Фенноскандию.

В 1907 г. основные принципы были провозглашены Седергольмом в работе «О гранитах и гнейсах» («Om granite och gneis»), снабженной пространством резюме на английском языке («On granite and gneiss»). В этом труде он дал широкий исторический обзор развития идей французских геологов в течение предыдущего столетия. Профессор Рид уделил должное внимание этой

ценной работе, являющейся наиболее существенной данью идеям французской школы и их приложению к архейским площадям Фенноскандии.

Стокгольмский конгресс 1910 г., и в особенности его длинные (A2, C1) и короткие (B1, B4, B7) экскурсии в различные части Балтийского побережья Швеции, послужили решающей поворотной точкой для приложения и развития модифицированных идей французской школы. Эти идеи были оценены в отношении возможности объяснения ими фактических данных древнего Фенноскандинавского щита.

На конгрессе присутствовали наиболее авторитетные представители ведущих стран, которые приняли участие в экскурсиях и дискуссиях. В числе их были известные знатоки специфических структур Канадского щита и вожди французской школы Ш. Барруа и П. Термье. Автор настоящей статьи был секретарем нескольких секций и полевых экскурсий и иногда выступал в качестве экскурсовода; он, следовательно, хорошо познакомился с этими проблемами и вызванными ими разногласиями. Седергольм продемонстрировал свои идеи, проследив шаг за шагом все переходы от неизменных осадочных пород через сложные промежуточные разности к массивным гранитам, которые замещают их без видимых нарушений. Он неоднократно применял выражение «гранитизация» к изученным породам и объяснял процессы их формирования как *диффузное пропитывание* ранее существовавших (осадочных и базальтовых эффузивных) пород *благодаря привносу чуждого материала снизу, без полного расплавления материнских пород в какой-либо их точке, но с частичным растворением и выносом избыточных компонентов.* В этом отношении он вполне разрешил *проблему пространства* и блестяще объяснил последовательность во времени различных динамических, химических и кристаллизационных процессов, наблюдающихся в горных породах. Он также тщательно указывал на различие между его собственной позицией и взглядами Холмквиста (Holmquist); последний допускает частичное плавление и перекристаллизацию материнских пород, но не привнос постороннего вещества в результате диффузии.

Полевые демонстрации Седергольма и его интерпретация наблюдаемых явлений встретили почти единодушную и почти гибельную для них оппозицию. Петрологи, участники конгресса, под влиянием новых возможностей приложения к петрологии «точных» физико-химических законов и методов, только что высказанных в докладах конгресса И. Х. Л. Фогтом (I. H. L. Vogt, Христиания) и А. Л. Дзем (A. L. Day, Вашингтон), объясняли структуры и взаимоотношения пород обычным абстрактным путем — суммарным результатом магматического акта и дифференциации.

Противники Седергольма взяли своей отправной точкой равномернозернистые, массивные гранитные породы, генезис которых был неизвестен, но появление которых в данном месте предположительно связывалось с насильственным внедрением магмы. Никакого внимания не было обращено ни на пространственные соотношения, ни на постоянство геометрии структур и текстур.

Вожди французской школы, присутствовавшие на конгрессе, хотя они и неоднократно повторяли свои взгляды относительно «фильтрующих колонн», в своих докладах, читанных конгрессу, повидимому, оказались не в состоянии интерпретировать структуры, наблюдавшиеся в Фенноскандии, и решить те весьма сложные проблемы, которые они поднимают. Один из представителей французской школы (Ш. Барруа), не присоединяясь полностью к оппонентам Седергольма, выдвинул компромиссное положение, именно, что возникшие вопросы еще не созрели для разрешения.

Несдавшийся Седергольм продолжал указывать на возможность достижения убедительного решения путем сравнительного изучения более молодых формаций, поскольку он согласился с Барруа, что «гнейсы и лептиты могут быть любого геологического возраста». В этой связи он подчеркнул значение приложения к докембрию принципа актуализма. По его собственному выражению, он как «защитник дьявола» не уступил и даже в одном из последних заседаний конгресса указал на некоторые альпийские аналогии. Тем не менее, даже местные геологи, которые ранее держались взглядов, близких взглядам Седергольма, так как были хорошо

знакомы с полевыми данными, теперь изменили свою точку зрения. Наоборот, ученик А. Г. Хогбома (A. G. Högbom), доктор Ж. М. Собраль (J. M. Sobral) из Аргентины, занимавшийся геологической съемкой и исследованиями районов Нордингро (Nordingrå) и Ульфе (Ulfö) на побережье северной Швеции, в краткой сводке для членов экскурсии А2 энергично высказался за невозможность объяснения взаимоотношений пород района простой или сложной магматической дифференциацией. Среди других данных он указал на тот факт, что включения иотнийских кварцитов в долеритовых дайках полностью превратились в гранитные породы типа рапакиви, без всяких признаков плавления.

Ценные наблюдения Собрала были опубликованы позднее (1913) в виде статьи «Материалы к геологии района Нордингро», которую сейчас очень трудно достать.

Несмотря на всеобщую оппозицию, Седергольм не сдался. Следующим летом (1911) он провел экскурсию на своей собственной родине, южной Финляндии, в сопровождении многочисленных представителей скандинавских петрографов, включая И. Х. Л. Фогта. Экскурсия имела целью уяснение новых идей на материале архейских структур и интерпретацию последних. Эта попытка, однако, также кончилась неудачей. Даже в том случае, если тот или иной из участников соглашался с интерпретацией Седергольма, так как не мог предложить других удовлетворительных объяснений, то впоследствии, по возвращении на родину, когда калейдоскопическое разнообразие зрительных впечатлений тускнело, а вера в Брегрепа — Розенбуша (Brögger — Rosenbusch) восстанавливалась до нормальной силы, «опасные» идеи снова отбрасывались.

В высказываниях антагонистического Седергольму большинства, возглавляемого Фогтом, по существу не затрагивались три важнейшие проблемы в изучении архея и его структур: *проблема пространства, проблема времени и проблема приложимости к докембрию принципа актуализма.*

Последняя проблема всегда была господствующей в мышлении Седергольма. Даже после второй неудачи

Седергольм все же продолжал следовать своему пути, несмотря на полуироническое отношение, с которым были встречены Северным геологическим обществом его последующие сообщения. Он работал над установлением стратиграфии финляндской части Фенноскандии, фиксируя легко распознаваемые горизонты суперкрупных метабазитов. Он также стремился ставить перед собой такие задачи, разрешение которых связано с вопросами химии и физической химии. Он избегал ссылок на французскую школу и дискуссий относительно происхождения древнейших гранитов (и их гнейсов), которые он неуверенно отнес к магматическим дериватам, образовавшимся из жидкого расплава, пришедшего из неизвестных глубин внутренних частей земли.

Этот частичный компромисс до некоторой степени был обязан давлению, которое оказала поспешная критика, аналогичная той, которая подразумевается в ныне вышедшей из употребления фразе «*corpora non agunt nisi soluta*»<sup>1</sup>, которая так часто и так неправильно цитировалась во время экскурсии 1911 г.

Вследствие этого давления часть седергольмовских определений и новых терминов, предложенных им в его ценных монографиях и статьях 1923, 1926 и 1934 гг., имеет некоторую неясность и частично меняющиеся значения, а приверженность его к выродившейся к тому времени французской школе девятнадцатого столетия перестала быть явной. Таким образом, упорная обструкция Седергольму на конгрессе 1910 г. отсрочила дальнейшее развитие идей французской школы почти на 16 лет.

Проблемы, которые выше выделены курсивом, были в дальнейшем разработаны последователями Седергольма — Баклундом и Вегманом (Wegmann) в ряде заметок и статей, опубликованных между 1929 и 1943 гг. В свете этих, более поздних работ оказалось, что прежние идеи Седергольма имели верное направление, и его уступки, сделанные им из уважения к другим геологам, были не нужны. Более того, принципы, на которых

<sup>1</sup> Тела не реагируют, не будучи растворены.

основана его докембрийская стратиграфия, явились твердым фундаментом для дальнейших исследований.

Теперь доктор Рестолл (Rastall) в своем обзоре докладов Рида поднимает несколько вопросов, на которые необходимо дать ответ. Эти на первый взгляд очень ясные вопросы являются в действительности очень трудными, и на них нельзя ответить просто. Некоторые из них, к несчастью, еще не могут считаться созревшими для своего разрешения. Однако недавние работы о гранитизации дали некоторые намеки на ответы, которые и могут быть суммированы в общих чертах.

Наиболее важные вопросы могут быть поставлены примерно так: 1) Почему в докембрии или архее вулканическая деятельность, как интрузивная, так и эффузивная, была более интенсивной и более широко распространенной, чем в поздние эры? В этом вопросе заключена та мысль, что принцип актуализма не приложим или только частично приложим для столь отдаленных времен. 2) Почему порода, образующаяся в результате замещения, всегда представляет гранит? 3) Каков источник замещающего вещества — «эманаций»? 4) Каково происхождение малых гранитных интрузий?

Попытку ответить на эти вопросы можно найти в нижеследующем очерке новейших идей, касающихся этих проблем.

Продолжительность докембрийской эры (включая архей) составляет три четверти общего возраста земли, который согласно астрономическим оценкам равен  $2 \times 10^9$  лет. Наиболее древними породами, для которых известен их абсолютный возраст, являются граниты и пегматиты в Манитобе (Manitoba), которым около  $1,8 \times 10^9$  лет. Еще старше этих гранитов, однако, те породы, в которые они внедрились. Эти породы представлены конгломератами, включающими сглаженные водой гальки кварцитов и известняков, в обоих случаях содержащих карбонатный материал. Имеются, таким образом, несомненные реликты существования на земле воды и соответствующих биологических условий до появления этих древних гранитов. Ясно также, что в эти отдаленные времена выветривание и перенос продуктов

этого выветривания были такими же активными, как и ныне.

Следующим шагом в этом последовательном мышлении должна быть экстраполяция данных последней четверти истории земли на три предшествовавшие четверти. Действительно, почему следует думать, что эволюционное развитие геосинклиналей, история каждой из которых оканчивается революционным этапом, должно было начаться на границе докембрия и кембрия (около  $5 \times 10^8$  лет назад), впервые достигнув наибольшей силы во время каледонской орогении, которая в отношении материала, структуры и размеров вполне сравнима с самой молодой орогенией — альпийской? . .

На основе стратиграфических методов Седергольма в докембрии Фенноскандии теперь совершенно реально различаются четыре орогении различного возраста с различным направлением простираний (Баклунд, 1936А, 1937, 1941) и три из них грубо датируются измерениями абсолютного возраста (Холмс, 1937).

Все они изобилуют гранитными и гнейсовыми породами, однако настоящие осадочные образования тоже там присутствуют и становятся более обычными с уменьшением возраста. Темные метабазиты (метаморфизованные базальты), появляющиеся в одиночку или группами среди полосатых или массивных гранитных пород, представляют собой поверхностные потоки и силлы соответствующих периодов, ныне собранные в складки и нарушенные вместе с вмещающими породами.

Внутри каждой орогении видны все характерные признаки типичной «гранитизации» разных стадий. Метабазиты будинируются (*boudinée*), вмещающие их гранитные породы частично или полностью переходят в подвижное состояние, и в конце концов метабазиты полностью исчезают. Это не расплавление и не настоящая ассимиляция (Баклунд, 1943).

Гранитизация является единственным объяснением этого явления, таким, которое удовлетворяет требованиям геологического пространства и времени; и оно имеет силу не только для докембрийских орогений, но и для орогений всех времен. Идя назад от альпийской орогении к орогениям докембрийского времени, можно

шаг за шагом проследить постоянное увеличение количества гранитных пород, которые вытесняют осадочные породы и заключенные в них эффузивы. Если вычесть все граниты и «ортогнейсы» с их переходными стадиями и все кислые эффузивы или заменить все их первоначальными осадочными породами, то общее количество оставшихся настоящих магматических пород, т. е. метабазитов, образовавшихся в результате изменения габбро или базальта, будет примерно одного порядка в орогениях всех возрастов. Видимые различия зависят главным образом от глубины эрозионного среза, случайность которого на современной поверхности земли не позволяет их сопоставлять.

Таким образом, нет геологических доказательств существования более интенсивной вулканической деятельности (из абиссальных глубин) в далеко отстоящих от нас докембрийских временах по сравнению с третичным и постепенного изменения состава магмы, в ходе развития земли от крайней кислотности к исключительной основности. И, наконец, процесс гранитизации и его интенсивность не зависят от возраста орогении, в которой он имеет место. Он зависит только от глубины в геосинклинали. Отсюда можно сделать вывод, что принцип актуализма для этих процессов и здесь сохраняет свою силу и его можно распространить назад в докембрий, насколько это позволяет наш геологический опыт.

В настоящее время геосинклинальные осадки представляют собой широкое разнообразие продуктов разрушения, механической дезинтеграции, химического изменения и полного разложения пород более ранней орогении. Цементированные механические осадки дезинтегрированы заново и сортируются еще лучше. Химические осадки растворены и перераспределены частично с более широким рассеиванием, частично с появлением местных концентраций. Массивные породы изверженного происхождения (граниты и базальты) претерпевают сложное разложение. Их силикатные кристаллические решетки, обладающие высокой энергией, разрушаются благодаря выщелачиванию связанных катионов с значительной потерей энергии решетки и перестраиваются в листовидные решетки минералов

группы слюд и глин, обладающие меньшей энергией. С другой стороны, минералы с плотной внутренней структурой и высокой химической стойкостью, принадлежащие к так называемой «тяжелой минеральной фракции», вместе с некоторыми минералами из «легкой фракции», как, например, кварцем, избегают всеобщего процесса разложения. Вся эта огромная масса продуктов разрушения, переносясь воздухом и водой во всеобъемлющую геосинклиналь, претерпевает совершенную гравитационную сортировку и в конце концов находит покой в слоистых скоплениях минералов, обладающих приблизительно равной внутренней энергией.

Таким образом, сумма энергий решетки значительно меняется от одного слоя к другому, т. е., иными словами, в накопившихся конечных продуктах имеется весьма резко выраженная энергетическая анизотропия.

К концу эволюционной фазы развития геосинклинали наиболее растворимые продукты химической дезинтеграции пород осаждаются в виде пластообразных тел в верхней части осадочной толщи. Живые организмы также выполняют в геосинклинали существенную функцию. Помимо накопления известковых раковин и других твердых частиц, как известковых, так и кремнистых, в органических телах в связи с их жизнедеятельностью аккумулируются и дифференциально концентрируются (в крайних случаях в  $10^5$  раз) рассеянные химические элементы. Среди них нужно отметить Fe, Mn, F, Cl, B, P, V, Cu, Ni, Co, Mo, TR, Ra, U, Th, W и т. д. Некоторые старые приверженцы классической французской школы указывали на важное значение подобного рода исключительной аккумуляции, а недавние русские работы В. И. Вернадского (1924, 1929, 1930) и его школы еще раз подчеркнули важность подобного рода накопления и обогащения. Эти элементы распределены в соответствующих осадках в виде прослоек пятен и линз и в настоящее время располагаются в грубом согласии с направлением оси геосинклинали.

Краткий обзор осадочного материала, выполняющего геосинклиналь, показывает, что между отдельными его членами существует много переходов, зависящих от удельного веса, физических (включая энергию решетки)

и химических различий, несмотря на тот факт, что все вещества находятся на пути к выравниванию энтропии. Образно выражаясь, они только ожидают термального или какого-либо другого активного воздействия для того, чтобы прийти в равновесие.

Изучение проблемы замещения обломочных глинистых минералов геосинклинальных осадков во время революционной стадии орогенического цикла имеет по меньшей мере такую же давность, как и микроскопический метод исследования горных пород.

В связи с этим французская школа уже давно предложила термин «фельдшпатизация». Точное сопоставление химических анализов измененных и неизмененных аргиллитовых пород, показывает, что в измененных разностях всегда имеет место значительный привнос Na и Si и значительная потеря K и Al. Пути исчезновения уносящихся элементов K и Al, так же как и пути, по которым привносятся Na и Si, невидимы.

В 1917 г. Мильх (Milch) обнаружил, что на контакте с диабазом глинистые сланцы вмещающих пород показывают почти полное замещение компонентов, содержащих K, Fe, Mg, кварцем и альбитом, без какого-либо изменения объема и без какого-либо соответствующего уменьшения количества Na, Al, Si в прилегающей изверженной породе. Такого рода случаи, однако, долго рассматривались, как особые аномалии. Тогда Гольдшмидт (Goldschmidt, 1921) в монографии о Ставангере отметил широко распространенную альбитизацию глинистых сланцев, сопровождаемую весьма заметной K-фельдшпатизацией. Последняя выражается в развитии порфиробласт и «очков» микроклина, которые не только замещают альбит в глинистых сланцах, но и развиваются в виде округлых фенокристов<sup>1</sup> в переслаивающихся со сланцами вулканогенных зеленокаменных породах.

Конечные продукты изменения глинистых сланцев не отличимы от типичных «ортогнейсов» и гранитов, находящихся во внутренней части ореола, и Гольдшмидт

---

<sup>1</sup> Правильнее нужно было бы сказать метакристаллов. (Прим. перев.)

считает, что они образовались в результате метасоматоза.

Порядок привноса в глинистых сланцах Ставангерского района следующий: сначала Na и Si, а затем Na вместе с K и Si. В зеленокаменные породы привносились Na, Ca, Fe и Mg' и выносились из них K, Al и Si.

Явления, которые наблюдались в каледонидах Ставангера, имеют прекрасное развитие и теперь хорошо известны в различных архейских орогениях Фенноскандинавского щита; однако во времена исследований Гольдшмидта скандинавские ученые не могли согласиться с его интерпретацией, и при первой демонстрации в поле едва не возникла дискуссия относительно проблемы пространства.

В песчанистых осадках гранитизация проявляется в развитии крупных фенокристаллов<sup>1</sup> полевого шпата и кварца. Опять-таки они могут образоваться благодаря привносу; однако в некоторых случаях они, возможно, являются результатом миграции и перекристаллизации в пределах самой песчанистой породы.

В кварцитах замещение видно очень хорошо. Оно обычно начинается с привноса K и Al (калиевый полевой шпат), за которым следует более поздний привнос Na—Al и Ca—Al вместе с Fe—Mg', на что указывает появление небольшого количества биотита и магнетита. Миграция Si доказывается прекрасно выраженными импликационными структурами (прорастаниями) кварца и калиевого полевого шпата. Они имеют вид эвтектических структур, но относительные количества кварца и полевого шпата в них постоянно меняются (Дрешер-Каден, Drescher-Kaden, 1942). По всей вероятности, замещение кварцитов требует более высоких РТХ условий, чем это необходимо для изменения глинистых сланцев, так как аргиллитовые породы могут быть полностью гранитизированными, в то время как переслаивающиеся с ними слои кварцитов остаются неизменными или почти неизменными. Преимущественная фиксация K в кварцитах, в противоположность фиксации Na в аргил-

<sup>1</sup> См. примечание на стр. 327.

литовых породах, может указывать, что К представляет собой вещество, вынесенное из гранитизированных пород аргиллитового типа. Такая интерпретация хорошо согласуется с упомянутым выше замедлением в гранитизации кварцитов. Проникала ли Na—Si группа мигрирующих веществ в кварциты без фиксации в них в виде каких-либо новообразований при господствующих тогда особых РТХ условиях, в то время как аргиллитовые породы были гранитизированы, или эти вещества находили другие более легкие пути, совершенно не входя в кварциты, решить трудно. Существуют некоторые указания на то, что первое объяснение, пожалуй, более правильно (Крокстрем, Krokström, 1946).

Явления замещения в карбонатных породах весьма сложны, и первоначальное стратиграфическое положение и геологическое окружение каждой известняковой формации являются чрезвычайно существенными факторами. Об этом можно судить по разнообразию изменений известняков (и доломитов) в глубоко залегающих контактах различных районов. Там, где имеет место существенный привнос Si, даже иногда при сравнительно слабой степени продвижения реакции, там внешняя оболочка карбонатной породы замещается мощной броней зонально располагающихся силикатных минералов. Мафические компоненты залегают главным образом во внутренней части этой зоны, а фельзитовые (лейкократовые) тяготеют к ее внешнему краю. В фельзитовой зоне присутствуют и плагиоклазы, и калиевый полевой шпат. С приближением к вновь образуемому граниту всегда наблюдается уменьшение анортитовой молекулы в плагиоклазе и появление кварца.

В связи с этим наиболее замечательным является фронтальное продвижение зоны Fe—Mg—Si минералов диопсид-геденбергитового и тремолит-актинолитового рядов, которые в рассеянном состоянии находятся также внутри самих известняков. В последнем случае они образуют своеобразные крапчатые породы, считаемые обычно результатом «дедоломитизации». Во фронтальной зоне Ca—Fe—Mg минералы образуют плотную диопсидовую или амфиболо-пироксеновую породу. По мере продвижения замещающего гранита вначале еще остаются

небольшие участки известково-железо-магнезиальной породы, но вскоре и они претерпевают полное растворение и исчезают в новообразующемся граните.

В тех случаях, когда гранитизация продвигалась быстро, передняя пироксен-амфиболовая зона полностью отсутствует; возможно, что она исчезает в образующемся граните немедленно после своего образования, вследствие чего получается непосредственный гранитно-известняковый контакт.

В случае гранитизации карбонатных пород вносящимися элементами являются Si, Al (Mg, Fe), Na, K и Ti, а выносящимися: Ca, Mg' (в конечном счете также Fe) и CO<sub>2</sub>. В процессе гранитизации из породы выносятся по крайней мере 90% массы всего CaO и CO<sub>2</sub>.

Наконец, при рассмотрении гранитизации геосинклинальной толщи нельзя не сказать о зеленокаменных породах (базитах), являющихся представителями настоящих магматических пород геосинклинали. Они играют очень различную и временами очень важную роль в массе осадочных образований, залегая по большей части среди глинистых осадков. Настолько часто говорится об «автометаморфизме» зеленокаменных пород, что можно подумать, что этот термин был введен специально для них. Однако в большинстве своем эти породы являются поверхностными потоками, которые должны были терять большую часть своих летучих компонентов в момент извержения. Больше того, образцы молодых вулканических лав, взятые со дна океана на большой глубине, не показывают подобного «автометаморфизма» и не превратились в зеленокаменные породы.

Зеленокаменные породы, залегающие среди массы геосинклинальных осадков, представляют собой местные центры повышенной энергии, обладающие высоким удельным весом и твердостью, совершенно отличным от окружающих пород химическим составом, и высокой внутренней энергией. Следовательно, по их контактам по направлению к вмещающим породам имеет место резкое падение энергетического градиента. Такие условия благоприятствуют возникновению сложных химических и динамических реакций, при которых возможна миграция вещества в соответствии с градиентом.

Первая серия изменений, наблюдающихся в породах этой группы, выражается в амфиболитизации — метасоматической стадии, приблизительно отвечающей различным членам «минеральных фаций» Эскола (Escola, 1914, 1921). В отношении баланса вещества амфиболитизация характеризуется значительной потерей Ca при одновременном приобретении Na и небольших количеств Al и возможно Si.

Дальнейшая серия изменений, наблюдаемых в породах этой группы, ведет к образованию эклогитов. Эти изменения заключаются в потере щелочей (преимущественно Na), Al и некоторого количества Si вместе с заметным увеличением Ca, что сопровождается появлением минералов малого молекулярного объема, т. е. с более плотной атомной упаковкой.

В наиболее далеко идущих стадиях гранитизации зеленокаменных пород образуются диориты, гранодиориты и граниты. Для своего образования эти породы требуют значительного привноса Si, Na и K с соответствующим выносом железо-магнезиальных компонентов и Ca (Коржинский, 1937).

В других местах геосинклинальной толщи типичные «зеленокаменные породы» могут казаться отсутствующими. В действительности в этих случаях они представлены скарновыми породами, имеющими неправильные границы и разнообразные структуры и содержащими крупные порфиробласты мафических минералов (Backlund, 1943). Превращение геосинклинальных базальтических пород в скарны зависит от привноса Mg и потери Ca, Fe и K.

Всегда ли в результате замещения получается гранит? Даже из приведенных выше общих положений ясно, что это не так. Изменение зеленокаменных пород приводит к образованию меланократовых разностей; это происходит также и в результате фиксации выносящихся из гранитизированных пород Fe, Mg, TiO<sub>2</sub> и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> во фронтальной зоне гранитизирующихся известняков или в других местах, где образуются породы, богатые пироксеном и амфиболом. Более того, уже есть некоторые доказательства (Д. Л. Рейнольдс, 1944), что основные породы, являющиеся кровлей отдельных тел пост-тектонических

гранитов, образовались за счет интродуцированных аргиллитовых пород в результате внедрения и фиксации Са—Fe—Mg' материала, принесенного из нижележащей зоны гранитизации.

Откуда идут эманации? Тщательное изучение баланса вещества различных горных пород геосинклинальной толщи показывает, что эманации не могут быть идентифицированы с «соком» («*ichog*») Седергольма. Их специфичность и разнообразие слишком велики. Вещества, выносящиеся из одних геосинклинальных пород, могут привноситься в другие и там фиксироваться. Например, К, вынесенный из аргиллитовых пород, может быть источником К, привносимого в кварциты, а Si, вынесенный из кварцитов, может дать кремнекислоту, необходимую для гранитизации известняков.

Имеются доказательства того, что подобный процесс, по крайней мере в малых масштабах, действительно происходит (D. L. Reynolds, 1943, 1944). Однако после рассмотрения всех возможных процессов обмена вещества все же оказывается, что должно нехватать щелочей, особенно Na. Очень давно один из первых представителей французской школы (Термье, 1912) предположил, что источником К и Na в «фильтрующих колоннах» могут быть погребенные соляные месторождения. Возражения которые могут быть сделаны против этого предположения, достаточно ясны. Однако даже, если эта старая мысль французских геологов и заслуживает некоторого внимания, то все же в целом процессы гранитизации, действовавшие исключительно в геосинклинальных условиях и приведшие к полному перераспределению первоначальных элементов (предварительно сортированных во время эволюционного этапа развития геосинклинали), в результате простого наложения новых термических условий и появления в осадочной толще новых градиентов становятся похожими на некоторого рода «*perpetuum mobile*» (вечное движение). Этот вывод не согласуется с данными полевых наблюдений.

Значение термина «эманация», который так часто применяется в связи с гранитизацией, таким образом требует дальнейших объяснений. Ни в каком случае нельзя представлять себе циркуляцию и продвижение летучих

в обычном упрощенном смысле, как это некоторые предполагают (Кропоткин, 1940). В действительности она означает миграцию ионов в твердом веществе по путям структурных нарушений, деформаций и внутрикристаллических нарушений вследствие разности потенциалов энергии кристаллической решетки, результатом чего и является перестройка и замещение материала.

Микроморфологические особенности минералов метаморфических пород и наблюдаемая в них «коррозия» являются этому прекрасным доказательством.

Незначительный привнос Na и Si без видимой связи с гранитами, но в ассоциации с соответствующими термодинамическими условиями создает, повидимому, все необходимое для возникновения в геосинклинальных породах длинной серии цепных реакций. Только на поздних стадиях этих миграций ассоциация мигрирующих элементов, включая первоначально привнесенные Na и Si, вместе с Ti, K, Al, Fe, Ca и Mg, полученная из уже гранитизированных пород, обнаруживает некоторое подобие с гранитным составом. «Поровая магма» («pore magma», Эскола, 1932) или «интергранулярная пленка» («intergranular film», Вегман, 1935) способна, таким образом, существовать на более поздних стадиях процессов и в верхних частях орогенических зон.

Теперь следует осветить вопрос о малых гранитных интрузиях. Все предшествовавшие исследования показали, что метаморфизм осадочных пород сопровождается значительной потерей настоящих летучих и их смесей. Главнейшим из них является  $H_2O$ , но, кроме того, к ним относятся  $CO_2$ , F, Cl, P, B и другие. Чем выше степень метаморфизма, тем больше теряется летучих. Содержание летучих меняется от одной осадочной породы к другой. Например, содержание  $H_2O$  в уплотненных глинах, в том случае когда они полностью сцементированы, равно по крайней мере 3 процентам по весу, в то время как в кварцитах оно приближается к нулю. В кварцитах содержание Cl или F может сделаться значительным, а известняки, хотя бы и с наименьшим содержанием воды, при продвигающемся метаморфизме являются наиболее важным источником  $CO_2$  и P. После того как произошла полная гранитизация, летучие почти полностью исчезают

из гранитизированной породы; конечный, «нормальный» свежий гранит содержит только очень малое количество летучих, преимущественно  $H_2O$ . Это происходит потому, что наибольшее количество из этих летучих не может найти себе место в кристаллических решетках обычных минералов гранита. Отсюда следует, что впереди фронта гранитизации должно собираться «облако» летучих.

Из этого положения могут быть выведены три следствия:

1. Краевые части гранита *in statu nascendi* становятся обогащенными абсорбированными летучими (включая  $H_2O$ ); «интергранулярная пленка» становится весьма значительной и граниты делаются по своим свойствам все более и более похожими на жидкость, хотя температура может оставаться относительно низкой.

2. Натяжение в породах, покрывающих граниты, резко увеличивается, и таким образом кровля оказывается подготовленной для инъекции благодаря развитию в ней трещин и сбросов.

3. Давление внутри верхней части области гранитизации делается гидростатическим по мере увеличения жидкостности гранитов.

Эти условия создают в краевых частях исключительно резкую энергетическую РТ ступень, которая содействует особенно быстрому продвижению «фронта гранитизации», и таким образом на высоких стратиграфических уровнях образуются небольшие «интрузии» (Кропоткин, 1940). Таким образом вовсе нет необходимости допускать, что малые гранитные интрузии и дайки гранитного состава являются дериватами истинной магмы абиссального происхождения или что они кристаллизовались из гомогенного магматического расплава.

Вышеприведенный обзор возможно является слишком односторонним и обходит молчанием многие исследования, произведенные в этом направлении в других странах, вне Фенноскандии. Однако он написан с целью заполнить тот пробел, который остался после того, как в начале нынешнего столетия умолкли французские исследователи. Он написан также для того, чтобы объяснить, как и почему Седергольм, этот пытливый ученик Бреггера и Розенбуша, взялся за дальнейшую разработку

этих идей. Огромную роль Седергольма в этом отношении при той, почти единодушной оппозиции, с которой ему пришлось сталкиваться в течение десятков лет, нельзя переоценить. Теперь его идеи возможно проводятся гораздо шире, чем он когда-либо мечтал.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- Вернадский В. И., Биосфера, Научн.-тех. изд., 1926.
- Коржинский Д. С., Зависимость минералообразования от глубины, *Зап. мин. общ.*, сер. 2, **66**, 368—396, 1937.
- Кропоткин П. Н., О происхождении гранитов, *Сов. геол.*, 9, 32—43, 1940.
- Adams F. D., The transfusion of matter from one solid to another under the influence of heat. A new factor in the process of metamorphism, *Canadian Journ. of Research*, **2**, 153—161, 1930.
- Backlund H. G., A: Der „Magmaaufstieg“ in Faltengebirgen, *C. R. Soc. géol. Finlande*, **9**, 293—347, 1936.
- Backlund H. G., B: Zur genetischen Deutung der Eklogite, *Geol. Rundschau*, **27**, 47—61, 1936.
- Backlund H. G., Die Umgrenzung der Svekofenniden, *Bull. Geol. Inst. Ups.*, **27**, 219—269, 1937.
- Backlund H. G., The problems of the Rapakivi granites, *Journ. Geol.*, **46**, 339—396, 1938.
- Backlund H. G., Die ältesten Baueinheiten von Fennoskandia. Ein Beitrag zur Deutung des „Urgebirges“, *Mitt. Naturf. Ges. Schaffhausen*, **17**, № 3, 31—73, 1941.
- Backlund H. G., Einblicke in das geologische Geschehen des Präkambriums, *Geol. Rundschau*, **31**, 79—148, 1943.
- Barrois Ch., Sur les relations tectoniques des granites grenus et gneissiques de Bretagne (1910). *C. R. XI-me Congr. Géol. Intern.*, *Stockholm*, **1**, 597—605, 1912.
- Day Arthur L., Are quantitative physico-chemical studies of rocks practicable? (1910), *ibid.*, **11**, 955—957, 1912.
- Drescher-Kaden K. F., Beiträge zur Kenntnis der Migmatit und Assimilationsbildungen sowie der synantektischen Reaktionsformen, *Chemie der Erde*, **14**, 157—238, 1942.
- Eskola P., On the petrology of the Orijärvi region in Southwestern Finland, *Bull. Comm. Géol. Finlande*, **40**, 1914.
- Eskola P., The mineral facies of rocks, *Norsk. Geol. Tidsskrift*, **6**, 143—194, 1921.
- Eskola P., On the origin of granitic magmas, *Tschermaks min. u. petr. Mitt.*, **42**, 455—481, 1932.

- Goldschmidt V. M., Die Injektionsmetamorphose im Stavanger-Gebiete (1920), *Videnskapsselskapets i Kristiania Skrifter. I. Mat.-naturv. Klasse*, **10**, 1921.
- Hedvall J. A., Die Reaktionsfähigkeit fester Stoffe, Leipzig, 1938.
- Holmes A., Transfusion of quartz xenoliths in alkali basic and ultrabasic lavas South-West Uganda, *Min. Mag.*, **24**, 408—420, 1936.
- Holmes A., The Age of the Earth., Edinburgh, 188—193, 209, 1937.
- Holmes A., Leucitized granite xenoliths from the potash-rich lavas of Bunyaruguru, South-West Uganda, *Amer. Journ. Sci.*, **243-A** (Daly vol.), 313—332, 1945.
- Holmes A., Natural history of granite, *Nature*, **155**, 412—415, 1945.
- Krokström T., Feldspathization and boudinage in a quartzite boulder from the Västervik area, *Bull. Geol. Inst. Ups.*, **31**, 389—400, 1946.
- Milch L., Über Adinoliten und Adinolschiefer des Harzes, *Zeitschr. d. D. Geol. Ges.*, **69**, 349—486, 1917.
- Niggli P., Das Problem der Granitbildung, *Schweiz. min. petr. Mitt.* **22**, 1—84, 1942 (см. наст. сборник, стр. 15—113).
- Perrin R. et Roubault M., Les réactions à l'état solide et la géologie, *Bull. Serv. d. la Carte géol. Algérie*, 5-e serie, **1**, 1937.
- Perrin R. et Roubault M., Le granite et les réactions à l'état solide, *ibid.*, **4**, 1939.
- Rastall R. H., The Granite Problem, *Geol. Mag.*, **82**, 19—30, 1945 (см. настоящий сборник, стр. 295—315).
- Read H. H., Meditations on granite, I and II, *Proc. Geol. Assoc.*, **54**, 64—85, **55**, 45—93, 1943—1944.
- Reynolds D. L., Demonstrations in petrogenesis from Kiloran Bay, Colonsay, I. The transfusion of quartzite, *Min. Mag.*, **24**, 367—407, 1936.
- Reynolds D. L., A gabbro-granodiorite contact in the Slieve Gullion area and its bearing on Tertiary petrogenesis, *Q. J. G. S.*, **97**, 1—38, 1941.
- Reynolds D. L., The albite-schists of Antrim and their petrogenetic relationship to Caledonian orogenesis, *Proc. Roy. Irish Acad.*, **48B**, № 3, 43—66, 1942.
- Reynolds D. L., Granitization of hornfelsed sediments in the Newry granodiorite of Goragwood quarry, Co. Armagh, *ibid.*, **11**, 231—267, 1943.
- Reynolds D. L., The south-western end of the Newry igneous complex, *Q. J. G. S.*, **99**, 205—246, 1944.
- Sederholm J. J., On granite and gneiss, their origin, relations, and occurrence in the Pre-Cambrian complex of Fenno-Scandia, *Bull. Comm. Géol. Finl.*, **23**, 1907.
- Sederholm J. J., On migmatites and associated Pre-Cambrian rocks of South-western Finland. P. I. The Pelling region, *ibid.*, **58**, 1923.

- Sederholm J. J., P. II. The region around the Barösundsfiärd W. of Helsingfors and neighbouring areas, *ibid.*, 77, 1926.
- Sederholm J. J., P. III. The Åland Islands, *ibid.*, 107, 1934.
- Sobral J. M., Contributions to the geology of the Nordingra, region, Northern Sweden, Upsala, 1913.
- Termier P., Sur la genèse des terrains cristallophylliens (1910), *C. R. XI-me Congr. Géol. Internat. Stockho'm*, I, 587—595, 1912.
- Vernadski V. I., La géochimie, Paris, 1924.
- Vernadski V. I., Geochemie in ausgewählten Kapiteln, Leipzig, 1930.
- Vogt J. H. L., Über die Bedeutung der physikalischen Chemie für die Petrographie, *C. R. XI-me Congr. Géol. Intern. Stockholm*, II, 947—964, 1912.
- Wegmann C. E., Zur Deutung der Migmatite, *Geol. Rundschau*, 26, 305—350, 1935.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие к русскому переводу . . . . .	5
<b>П. НИГГЛИ</b>	
Проблема образования гранитов. <i>Перевод с немецкого В. В. Ляховича</i> . . . . .	15
<b>Н. БОУЭН</b>	
Магмы. <i>Перевод с английского В. Ф. Морковкиной</i> . . . . .	114
<b>Х. РИД</b>	
Размышления о граните. <i>Перевод с английского Т. М. Дембо</i>	143
<b>Р. РЕСТОЛЛ</b>	
Проблема гранита. <i>Перевод с английского В. И. Гоньшаковой</i>	295
<b>Х. БАКЛУНД</b>	
Проблема гранитизации. <i>Перевод с английского Т. М. Дембо</i>	316

Редактор *А. П. Лебедев*  
Технический редактор *Б. И. Корнилов*  
Корректоры *А. Ф. Рыбальченко*  
и *Ю. Н. Морозов*

✱

Сдано в производство 21/II 1949 г.  
Подписано к печати 18/IV 1949 г.  
А-3860. Печ. л. 21 $\frac{1}{4}$ . Уч.-издат. л. 19,3  
Формат 82×108 $\frac{1}{32}$ . Цена 20 р. 50 к.  
Издат. № 5/188. Зак. № 4693.

✱

4-я типография им. Евг. Соколовой  
главполиграфиздата  
при Совете Министров СССР,  
Ленинград, Измайловский пр., 29.

Лета 200. 500

61