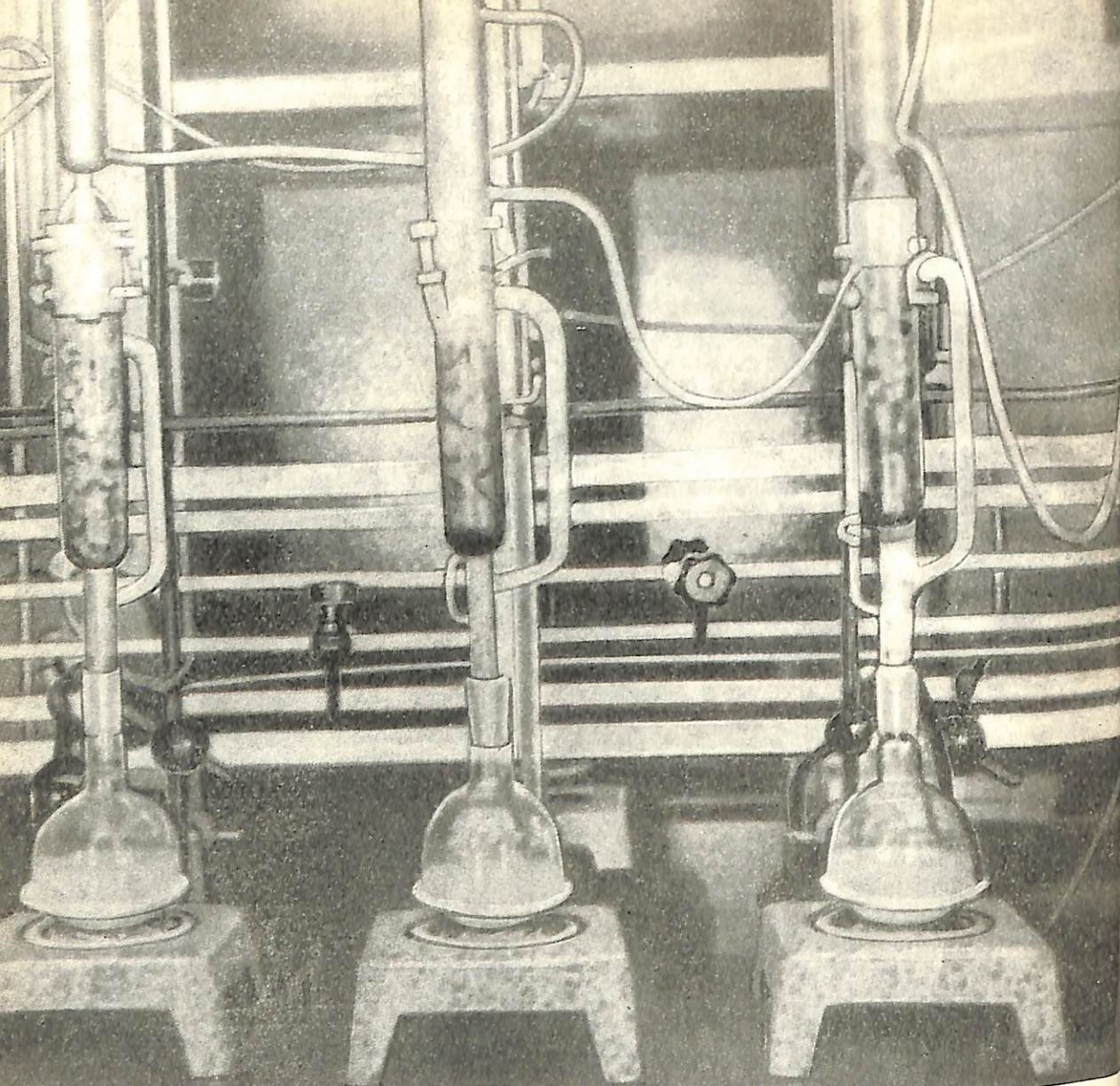


НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Ж. ПЕАРО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
ГЕОХИМИЧЕСКОГО
ВЫВЕТРИВАНИЯ
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
ПОРОД





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ

G. Pedro

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques,
Versailles (Seine-et-Oise)

Contribution a l'étude expérimentale
de l'altération géochimique
des roches cristallines

INSTITUT NATIONAL
DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
PARIS 1964

22(09)
П 241

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Фундаментальные

труды

зарубежных

ученых

по

геологии,

геофизике

и

геохимии

Ж. Педро

ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД

291348

Издательство

«МИР»

Москва

1971

ПЕРЕВОД С ФРАНЦУЗСКОГО

М. В. Пастуховой

ПОД РЕДАКЦИЕЙ И С ПРЕДИСЛОВИЕМ

д-ра геол.-мин. наук А. Г. Коссовской

Работа французского исследователя содержит совершенно уникальные данные о динамике миграции в условиях поверхностного выветривания таких элементов, как алюминий, кремнезем, железо и др.

Экспериментальные исследования подобного рода с таким детальным моделированием условий природного выветривания, со столь полным и глубоким анализом полученных фильтратов, измененных пород и новообразований еще никем и нигде не проводились. Подведенный автором полный геохимический баланс веществ, участвующих при экспериментах в процессах выветривания в разных климатических условиях, представляет большой практический интерес и найдет применение при изучении и интерпретации природных процессов образования месторождений осадочных полезных ископаемых, тесно связанных с корами выветривания.

Книга привлечет внимание широкого круга геологов, геохимиков и почвоведов, специалистов, занимающихся изучением бокситов, латеритов, осадочных железных руд, пород кор выветривания и глинистых толщ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Экспериментальные исследования, моделирующие разнообразные типы геологических процессов и явлений, получают все большее распространение в различных сферах геологии и связанных с ней науках. Это вполне естественно, так как синтез наблюдений над природными явлениями и воспроизведение их в лабораторных условиях, максимально приближенных к природным, позволяют получить наиболее полную информацию не только о конечном результате какого-либо процесса, но и о ходе и механизме его развития.

Моделированию явлений химического разложения пород принадлежит одно из ведущих мест среди экспериментальных исследований в геологии. Причины этого понятны. Характер разложения первичных материнских пород и получаемые при этом продукты определяют дальнейший ход очень многих геологических процессов, представляющих первостепенный теоретический интерес. Развитие кор выветривания с приуроченными к ним многочисленными полезными ископаемыми, формирование почв и, наконец, общий состав твердых и растворенных продуктов, поступающих в бассейны седиментации, полностью контролируются особенностями процессов химического разложения. Исключительную важность имеет изучение этих процессов для решения проблемы генезиса бокситов.

Первые экспериментальные работы по химическому разложению пород имеют более чем столетнюю давность. Автором их является Добрэ (1857—1879), по праву считающийся одним из основоположников экспериментальной геологии.

Систематические исследования, поставленные на современном уровне, появляются в конце 30-х годов. Среди них следует прежде всего назвать классические работы Корренса и его учеников (1938—1961), исследования И. Н. Антипова-Каратаева и др. (1956—1962) и фундаментальные работы И. И. Гинзбурга и его школы (1957—1968).

Основное направление этих работ выражалось в изучении изменения минералов и пород под воздействием различных агентов разложения, в качестве которых использовался электролиз, а также разнообразные химические реагенты, начиная от чистой воды, воды с CO_2 и различных неорганических и органических кислот; проводился также учет воздействия на ход химического разложения повышающихся температур и продолжительности времени эксперимента.

В последние годы количество экспериментальных работ как советских, так и зарубежных исследователей, посвященных изучению процессов разложения минералов и динамике поведения основных породообразующих элементов (кремния, алюминия, щелочных и щелочно-земельных металлов) в различных физико-химических условиях непрерывно возрастает, и одно перечисление их заняло бы слишком много места. Поэтому мы отсылаем читателя, желающего более подробно ознакомиться с современным состоянием проблемы, к сводным работам: «Экспериментальные исследования по разложению минералов органическими кислотами» (1968), где (в статьях И. И. Гинзбурга и др. и Д. Г. Сапожникова) дан довольно подробный обзор работ, главным образом советских исследователей; к книге Милло «Геология

ОПИСАНО

Редакция литературы по вопросам геологических наук

Фундаментальная
БИБЛИОТЕКА
ГЕОЛ. И

глин» (гл. 4, 5, 10), где изложены важнейшие результаты экспериментальных исследований зарубежных ученых, и сборнику «Вопросы минералогии глин», ИЛ, М., 1962. Кроме того, известное представление о состоянии проблемы дает обширная библиография по данному вопросу, прилагаемая к книге Ж. Педро, дополненная рядом наиболее важных работ последних лет.

Книге Ж. Педро «Экспериментальные исследования геохимического выветривания кристаллических пород» принадлежит особое место. Пожалуй, это первое исследование, в котором автору удалось создать наиболее достоверную «модель» процессов поверхностного выветривания и рассмотреть динамику поведения главнейших химических элементов в условиях, наиболее близких к естественным природным обстановкам.

Исключительный интерес результатов, полученных Ж. Педро, был обеспечен прежде всего разработанным им методом исследования. В качестве аппаратуры, позволяющей воспроизвести в эксперименте «экзогенный цикл воды», вызывающий химическое разрушение пород, был выбран обычный экстрактор «Соклет». Выбор прибора оказался очень удачным. Он позволил в довольно широких пределах варьировать условия опытов, близкие к естественным, и вести непрерывное наблюдение над характером преобразования первичного вещества на разных стадиях процесса. Экспериментатор мог одновременно и независимо оперировать двумя основными природными факторами, вызывающими разложение пород, — интенсивностью дренажа и температурой промывных растворов, меняя по желанию интенсивность воздействия каждого из искусственных агентов выветривания. Использование разных по составу растворов (дистиллированной воды, воды с CO_2 , различных кислот) позволило Ж. Педро учесть влияние различных химических реагентов на процессы выветривания и характер возникающих новообразованных продуктов. И наконец, выбор объектов эксперимента — пород, резко различных по своему химическому составу и структуре: гранита, базальта и трахиандезитовой лавы — позволил получить материалы, иллюстрирующие особенности преобразования главнейших типов кристаллических пород в разных обстановках выветривания.

При разработке условий эксперимента Ж. Педро особое внимание обратил на их максимальное приближение к условиям естественных процессов. При повышении интенсивности воздействия ведущих факторов (в частности, скорости фильтрации растворов или увеличении их температуры), которое было необходимо для «компенсации кратковременности сроков экспериментального выветривания», каждый раз с исключительной точностью воспроизводились реальные обстановки, существующие в тропических зонах земной поверхности. Интенсификация процесса осуществлялась только за счет непрерывности выбранного режима в течение всего опыта, в то время как в тропических областях такие условия существуют лишь спорадически в наиболее жаркое время и в периоды выпадения наиболее сильных дождей. Эти допущения позволили в доступные для эксперимента сроки (от 20 до 26 месяцев) получить очень ценные данные, с большой достоверностью моделирующие процессы выветривания, протекающие в природе.

Возможность варьировать интенсивность воздействия основных факторов выветривания дала важные сведения, позволяющие учитывать роль и эффективность каждого конкретного фактора в механизме химического разложения породы. Наконец, конструкция прибора позволила моделировать процессы, протекающие как бы в двух природных зонах — «атмосферной», в верхней части прибора, где обломки пород находятся в постоянной влажной среде в контакте с воздухом, и нижней, названной «зоной колебания уровня грунтовых вод», где происходит смена обстановок от полного обводнения до влажной атмосферы, такой же, как в верхней зоне.

Во всех опытах проводилось подробное изучение как твердой остаточной фазы выветривания, так и фильтратов, содержащих продукты разложения

Параллельное изучение химического состава остаточной твердой фазы и фильтратов и сравнение их с первичным составом неразложившихся пород позволило на любой стадии эксперимента подвести геохимический баланс процесса разложения породы.

Даже краткое перечисление исходных параметров проведенных опытов показывает тот огромный объем информации, который оказалось возможным получить в проведенных исследованиях. В вводной главе Ж. Педро подробно описывает прибор и применявшуюся технику эксперимента. Следует заметить, что возможность использования экстрактора в лабораторных работах по моделированию процессов видоизменения пород и минералов, по-видимому, значительно шире, чем это реализовано автором в опытах, описанных в книге. Отчасти это демонстрирует сам Ж. Педро в своих более поздних статьях, перевод которых помещен в виде дополнения к настоящей книге, в частности в статье, где описан опыт с силификацией брусита (стр. 245).

Несомненно, данный прибор и техника эксперимента привлекут внимание исследователей, работающих в области моделирования не только процессов разложения пород и минералов, но и их преобразования в различных физико-химических условиях, близких к природным обстановкам зон выветривания, диагенеза и эпигенеза.

Книга Ж. Педро состоит из трех частей. В первой подробно рассматриваются условия и результаты разложения пород при их длительном промывании дистиллированной водой. Этот эксперимент автор рассматривает как основной, фундаментальный опыт всей работы. Полученные результаты крайне интересны и важны, так как в них с большой наглядностью показаны сущность и механизм процесса латеритизации. Эксперимент, продолжавшийся около года, позволил получить на обломках базальта и трахиандезита в «атмосферной зоне прибора» железистые корочки, очень напоминающие «фазию прыника» тропических ферраллитных кор выветривания. Было установлено, что минералогически эти корочки состоят из первичных неразложившихся компонентов и новообразований, представленных бёмитом и аморфными гидроокислами железа. Характер преобразования обломков в «зоне колебания уровня грунтовых вод» оказался иным: в виде новообразованного белого налета на обломках и стенках прибора присутствовал хорошо окристаллизованный гиббсит, формирование которого осуществлялось в основном за счет привноса алюминия из верхней зоны прибора.

Процесс разложения гранита протекал несколько по-иному: 1) сплошная железистая корка в «атмосферной» зоне прибора не развивалась, ожелезненными оказались только пластинки биотита; 2) новообразования гидроокислов алюминия в нижней зоне прибора обнаружены не были.

Использование изоволюметрического метода расчета применительно к остаточным продуктам выветривания и детальное изучение фильтратов промывных вод позволили автору очень четко наметить единую качественную сущность протекающих процессов, отличающихся только своими количественными характеристиками. Вне зависимости от первичного петрографического типа породы при выветривании с чистой водой наблюдается интенсивный вынос кремнезема и оснований, полное накопление железа и титана на месте в виде гидроокисей, двойственное поведение алюминия, часть которого остается на месте, а часть выносится. Очень любопытен факт более интенсивного в некоторых случаях выноса кремнезема по сравнению с основаниями.

Изучение твердой фазы указанных фильтратов рентгеновским и электронно-микроскопическими методами, а также ДТА показало, что они представляют собой аморфные кремневые и алюмокремневые гели, причем последние состоят также в основном из кремния. Новообразованные глинистые минералы отсутствуют, что автор, по-видимому, справедливо связывает с недостатком необходимых структурных октаэдрических катионов. Добавление уксу-

нокислого магния привело к появлению в осадке разбухающего трехслойного компонента. Нельзя не отметить, что результаты данного опыта вступают в известное противоречие с материалами более позднего эксперимента, изложенными в одной из прилагаемых статей (стр. 245). Речь идет о попытке получить глинистые минералы путем фиксации тетраэдров кремнезема на октаэдрических слоях брусита. Категоричность вывода Ж. Педро о неосуществимости такого механизма мне кажется несколько поспешной и не совпадает как с его собственными более ранними данными, так и с результатами многих других исследователей. Скорее всего неудача, постигшая Ж. Педро в данном опыте, была связана со слишком высокими концентрациями вещества, а возможно, и какими-либо другими причинами, помешавшими кристаллизации слоистых структур.

Вторая часть книги посвящена экспериментальному изучению влияния на процесс выветривания и преобразования пород различных физико-химических, гидродинамических и температурных условий. Техника эксперимента остается постоянной, т. е. также используется прибор «Сокслет» с несколько меняющейся конструкцией деталей, обусловленной требованиями опытов.

В отдельных главах (5, 6) описываются результаты экспериментов с водой, насыщенной CO_2 , сероводородной и уксусной кислотами.

Наибольшее внимание уделяется опытам с CO_2 — одним из наиболее постоянных компонентов природных агентов выветривания. Опыты, проведенные с базальтом и гранитом, показали, что в обоих случаях выветривание носит уже не ферраллитный, как в первом опыте, а аллитный характер: в верхней зоне прибора идет интенсивное формирование бёмита, в нижней — гиббсита. Также интенсивно выносятся кремнезем, щелочи и щелочные земли, вместе с которыми уходит основная часть железа в закисной форме. Если первый тип выветривания моделировал образование ферраллитных кирасс тропических областей, то описываемый тип сравнивается Ж. Педро с формированием латеритных маложелезистых бокситов.

Опыты с сероводородом не имеют непосредственного отношения к моделированию процессов поверхностного разложения и несколько выпадают из общего плана книги в целом. Скорее их следовало бы отнести к лабораторному воспроизведению обстановок диагенеза зараженных сероводородом бассейнов.

Опыт с уксусной кислотой удачно воспроизводит условия интенсивного кислого разложения под воздействием органических кислот, которые характерны для природных обстановок, связанных с энергичным распадом органического материала.

Многочисленные данные по разложению различных минералов органическими кислотами содержатся в работах советских исследователей. Особенно интересные работы, о которых уже упоминалось выше, были проведены И. И. Гинзбургом и созданной им школой. Ж. Педро хорошо знает работы русских ученых и неоднократно ссылается на них.

Наиболее интересный и значимый результат кратковременного опыта с разложением уксусной кислотой базальта — успешное осуществление модели экспериментального подзолообразования. В течение опыта наблюдался интенсивный вынос всех компонентов, однако наиболее энергично выносились щелочи и алюминий при сравнительно меньшей подвижности кремнезема и железа. Полученные данные исключительно важны как для почвоведов, так и для литологов. После рассмотрения особенностей процессов выветривания под воздействием разных геохимических агентов автор переходит к оценке относительной роли климатических факторов, выбирая из них наиболее действенные — интенсивность дренажа и температурный режим.

Изучение процесса разложения базальта чистой водой в условиях пониженных дренажа и температуры по сравнению с соответствующими параметрами первого основного опыта дало весьма интересные и показательные

результаты. Дренаж, ослабленный примерно в 10 раз, практически не изменил общей картины ферраллитного выветривания, зафиксированной в опытах с интенсивной циркуляцией воды. Единственное существенное отличие — меньший вынос алюминия и соответственно значительно большее его накопление в остаточной фазе. Полученные результаты дают ценную информацию о необходимой норме годовых осадков, обеспечивающей развитие процессов ферраллитизации. По данным Ж. Педро, этот процесс уже энергично развивается при повседневном дренаже, равном 400 мм. Вероятно, в дальнейших опытах автору удастся наметить пределы осуществления явлений ферраллитизации.

Исключительно интересные результаты были получены в опыте с относительно пониженной температурой (20°C вместо 70°C первого опыта). Картина геохимического перераспределения элементов существенно изменилась: вместо накопления в остаточной фазе гидроокислов железа и алюминия, выноса алюминия и фиксации его в нижней зоне прибора в виде гиббсита происходило формирование новообразованного глинистого минерала с разбухающей трехслойной структурой. Автор рассматривает эту новообразованную фазу как продукт сиаллитного выветривания или промежуточный этап латеритообразования.

Третья, завершающая часть книги посвящена обобщению полученных экспериментальных материалов, рассмотрению динамики перераспределения основных породообразующих элементов в различных обстановках и геохимическому обоснованию различных типов выветривания и почвообразовательных процессов. Специальное внимание уделяется использованию полученных результатов для интерпретации природных явлений.

Основное достоинство книги Ж. Педро заключается в том, что автор в своих опытах выявляет не косвенные данные, позволяющие судить об общей направленности или тенденции того или иного процесса в условиях, далеких от природных, но получает прямые, непосредственные результаты, указывающие на необходимую совокупность факторов и относительную роль каждого из них в осуществлении главнейших типов химического разложения. Он выявил обстановки, обуславливающие течение двух основных типов химической эволюции вещества в поверхностной зоне: 1) процесса, связанного с энергичным выносом SiO_2 и накоплением в остаточной фазе гидроокислов алюминия, т. е. *процесса латеритизации* (или аллитизации, по Ж. Педро), и 2) процесса выноса всех элементов, характеризующегося, однако, гораздо более энергичным удалением алюминия и оснований и соответствующим накоплением в элювии кремнезема, т. е. *процесса подзолообразования*. Промежуточное положение между этими двумя крайними типами занимает процесс сиаллитизации, при котором осуществляется формирование глинистых минералов.

Используя в своих опытах наиболее выразительные петрографические и структурные типы кристаллических пород — базальт, гранит и трахандезитовую лаву, — автор наглядно показывает зависимость определенных особенностей того или иного типа разложения от первичного характера пород.

Однако следует подчеркнуть, что если остаточные фазы экспериментального выветривания и геохимический баланс вынесенных и оставшихся на месте компонентов достаточно близко воспроизводят протекающие в природе явления и позволяют понять сущность механизма латеритизации и породообразования, то попытки автора сопоставить результаты опытов с некоторыми седиментологическими процессами излишне смелы и далеки от действительности. Те части работы, где Ж. Педро пытается сравнить полученные ассоциации новообразованных минералов, сформировавшихся за счет вынесенных в фильтрах компонентов, с реальными парагенезисами, существующими в осадочных породах (парагенезис железных руд, черных глин с сульфатами и серой и т. д.), относятся к самым слабым разделам работы. Это

вполне естественно, так как создание модели осадконакопления в естественных бассейнах требует совершенно иных экспериментальных условий, чем те, которыми располагал автор, ставивший себе прежде всего задачу воспроизвести цикл разложения кристаллических пород.

Что касается особенностей седиментации в морских бассейнах, то данные Ж. Педро наиболее интересны, пожалуй, для объяснения генезиса многих кремнистых пород. Большая подвижность кремнезема и огромные массы этого вещества, выносимые, очевидно, из кор выветривания, легко объясняют частую ассоциацию мономинеральных кварцевых песчаных пород с кремнистыми накоплениями.

Слабо изучены новообразованные глинистые минералы, хотя сам факт формирования в процессе опытов трехслойных силикатов железо-магнезиального состава с разбухающей структурой чрезвычайно интересен. Ж. Педро обычно называет их смектитами. Этот термин около 10 лет назад был предложен для обозначения минералов с разбухающей структурой Подкомитетом по номенклатуре Британской группы исследователей глинистых минералов. Однако он не получил международного признания и почти не употребляется в отечественной литературе, где заменен определением «минерал из группы монтмориллонита» или «минерал с разбухающей структурой».

Ж. Педро для обозначения полученных им монтмориллонитоподобных минералов часто применяет термины «сапонит», «стивенсит», «боулингит». Вряд ли это целесообразно, поскольку ни один из этих минералов не изучен достаточно детально. Расчет кристаллохимических формул, приводимых Ж. Педро для глинистых минералов, совершенно условен: трудно представить, чтобы весь алюминий входил в решетку гипотетического полевого шпата и чтобы какая-то его часть не участвовала в построении триоктаэдрических и октаэдрических слоев глинистых силикатов. Поэтому во всех случаях лучше просто говорить о разбухающих железо-магнезиальных минералах монтмориллонитовой группы.

Нельзя не подчеркнуть, что в осадочных породах триоктаэдрические разбухающие минералы встречаются довольно редко и чаще всего относятся к группе смешаннослойных хлоритов-монтмориллонитов (корренситов), связанных с эвапоритовыми формациями. Это лишнее подчеркивает те натяжки, которые делает Ж. Педро, когда он использует факт новообразования глинистых минералов (вместе с гидроокислами железа, карбонатами или сульфатами) для обоснования близости экспериментальных минеральных парагенезисов с реально существующими осадочными ассоциациями.

Эти небольшие недостатки не умаляют ценности исключительно интересных экспериментов. Книга Ж. Педро, несомненно, привлечет широкое внимание специалистов различных отраслей — литологов, минералогов и почвоведов. Особенно интересна она будет для геологов, занимающихся проблемами генезиса бокситов. Не только полученные автором результаты, но и разработанная им техника экспериментальных исследований чрезвычайно полезны и могут быть использованы для постановки лабораторных работ по моделированию различных процессов преобразования пород и минералов, протекающих в поверхностной оболочке Земли.

В процессе перевода некоторые разделы книги были сокращены во избежание излишних повторений.

В виде дополнения прилагаются четыре более поздние статьи автора, в которых разрабатывается та же проблема, которой посвящена сама книга.

А. Коссовская

Понятие «выветривание пород» (*altération des roches*)¹ обычно охватывает группу явлений, которые в поверхностных условиях Земли вызывают разрушение субстрата на более или менее значительную глубину. Это разрушение, которое в ряде случаев представляет собой распад твердых пород на составные части (дезагрегация, физическое выветривание), гораздо чаще происходит в результате существенного химического разложения первичных минералов пород. Именно этот процесс называют химическим выветриванием, или разложением. Причина его — неустойчивость экзогенных образований в условиях биосферы, где они подвергаются воздействию различных «климатических» агентов. Подобное разложение пород, являющееся прелюдией к почвообразованию, знаменует более или менее значительным выносом химических элементов из первичных пород и в особенности их кристаллохимическим перераспределением, которое приводит к возникновению новых минералов (вадных, по Вернадскому [268]). Эти минеральные новообразования устойчивы в условиях земной поверхности, т. е. при давлении около 1 атм и при температурах, колеблющихся в пределах от -30 до $+40^\circ \text{C}$.

Основная задача настоящей работы заключается в установлении законов миграции, определяющих динамику поведения химических элементов при атмосферном выветривании и почвообразовании, и в выяснении условий, необходимых для их перегруппировки и создания новых минеральных видов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В течение длительного времени изучение процессов разложения пород в поверхностных условиях базировалось на наблюдении природных явлений. Полученные результаты, охватывающие все главные регионы большинства климатических зон земной поверхности, были изложены в многочисленных работах. Некоторые из них представляют собой фундаментальные исследования [81, 188, 266, 157, 158, 268, 123, 85, 26, 124, 219, 142, 222, 141, 193, 28].

Однако при этом исследователи постоянно сталкивались с затруднениями, связанными с тем, что представление об отдельных фазах развития процесса основывалось на изучении объектов, в которых этот процесс был уже завершен (почвы, коры выветривания). Как правило, такие объекты не сохраняют «воспоминаний» об отдельных этапах процесса выветривания и о тех факторах, которые его вызвали. В качестве примера можно привести процессы «подзолообразования», для объяснения которых привлекают данные изучения морфологии профилей подзолистых почв. Последние, однако, очень разнообразны по своему происхождению. Вероятно, этим объясняется то, что до сих пор еще точно неизвестны первопричины и характер начальных стадий развития этих процессов. Другим примером может служить «латеритизация», которая стала объектом большого числа исследований, основан-

¹ Французскому термину «*altération des roches*» соответствует английский термин «*Weathering*», немецкий «*Verwitterung*», португальский «*Meteorização*» и русский термин «выветривание».

ных исключительно на наблюдениях над железистыми панцирями или латеритными почвами. Постепенно многое в этом вопросе прояснилось, но даже сравнительно недавно опубликованные наиболее детальные работы, по-видимому, не могут внести ничего нового в дело изучения поверхностных образований [241, 28]. До сих пор остается еще много проблем, решить которые только на основе изучения природных объектов нам представляется невозможным.

В связи с этим возникла необходимость в других методах изучения; среди них весьма перспективным оказался экспериментальный метод. Собственно, это вполне закономерно, так как попытки изучить в лабораторных условиях влияние тех или иных реагентов (вода — CO_2 — различные кислоты) на поведение различных минералов или пород предпринимались уже давно [71, 72, 67, 68, 69, 253—256, 121, 61—65, 84, 151, 262, 134, 6 и др.]. Однако условия проведения этих опытов были очень далеки от природных поверхностных условий. Правда, Демолон [см. 75] пытался в своих опытах приблизиться к природным условиям. В 1930 г. он поместил в лизиметр гранит, который в течение 30 лет подвергался воздействию климата Версаля. Этот метод изучения можно было бы считать идеальным, если бы разложение вещества в поверхностных условиях происходило с достаточной скоростью и если бы аналогичные опыты можно было поставить одновременно в разных областях Земли с различными климатическими условиями.

В ходе эксперимента, поставленного в Версале и являющегося до сих пор единственным в своем роде, не произошло заметных изменений химического и минерального составов гранита [212].

Таким образом, возникла необходимость вновь обратиться к изучению процессов выветривания пород в лабораторных условиях, используя при этом так называемые методы экспериментального почвоведения [126]. Задача заключалась в том, чтобы создать «модель», которая позволила бы легко оперировать всем комплексом воздействующих на породу факторов. Постепенное накопление экспериментальных данных, раскрывающих значение различных факторов, должно сыграть важную роль в создании общей теории процессов выветривания.

Основное затруднение, возникающее при проведении всех экспериментов, — необходимость интенсификации процессов разложения пород, протекающих в природных условиях с очень малой скоростью. Это в свою очередь ставит под вопрос возможность проведения аналогии между «моделью» и природным явлением. Только непосредственное сравнение результатов экспериментов с данными, полученными при изучении природных явлений, позволит решить, приемлемы ли условия опыта. Совпадение результатов указывает на достаточную надежность экспериментальных данных.

Для того чтобы избежать ошибок, свойственных лабораторному синтезу, был принят ряд предосторожностей и выработаны следующие основные принципы, которые выдерживались при выполнении экспериментальных работ.

1. В ходе эксперимента всегда должны поддерживаться условия, близкие к природным; они должны воспроизводить явления экзогенного цикла. Если интенсивность воздействия факторов заметно усиливалась (например, увеличивалось ежедневное количество «атмосферных осадков»), тогда условия приложения этих факторов по возможности приближались к условиям земной поверхности. Например, вода падала на породу капля за каплей, так же как это наблюдается при выпадении дождя.

2. Породы, которые подвергались экспериментальному выветриванию, брались в виде обломков, а не порошка, как это до сих пор делали в большинстве опытов. Такой выбор позволял, во-первых, не слишком сильно изменять исходный материал, который, таким образом, приближался к природному (продукты физического выветривания). Кроме того, известно, что

при растирании породы в порошок нарушается кристаллическая структура составляющих ее минералов. Следовательно, опыты, поставленные с растертой породой, должны давать результаты, отличные от опытов, проведенных с массивными породами¹. Кроме того, материал в виде обломков можно изучать непосредственно под микроскопом до и после опыта, а это дает экспериментальному исследованию определенные преимущества.

3. Опыты продолжались до тех пор, пока исходные породы не претерпевали достаточно глубокого преобразования. Нужно быть уверенным в том, что появление каких-то новых признаков не является результатом изменений, затрагивающих только самую поверхность обломков, или связано с присутствием в породах инородных примесей. Количество вещества, подвергшегося разложению в процессе опыта, должно было составлять во всех случаях большую часть первичной массы породы. Это было необходимым условием, помогающим сивелировать первичную гетерогенность исходного материала и неточности методов подсчета.

Для получения представительных результатов нельзя было сводить выветривание лишь к процессу простой химической дегградации первичных минералов с переходом в раствор некоторого количества элементов. Чаще всего необходимо было продолжать эксперименты до появления в остаточной твердой фазе новообразованных минералов, которые можно считать единственными настоящими свидетелями глубокого разложения первичных пород.

В заключение следует отметить, что поскольку экспериментальный метод применялся нами при строгом соблюдении вышеперечисленных принципов, то полученные в конечном счете данные были достаточно надежными и позволили внести существенные поправки в основные положения теории выветривания пород, основанные на полевых наблюдениях. Ниже дается подробное описание экспериментальной установки, которая применялась при различных лабораторных исследованиях.

ОБЩИЙ ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выветривание пород в поверхностных условиях, которое является результатом воздействия прежде всего климатических и в особенности гидрологических агентов, таких, как атмосферные осадки и дренаж, тесно связано с природным «циклом воды», состоящим из четырех последовательных фаз: атмосферные осадки — инфильтрация и сток — накопление — испарение. Если в лаборатории использовать экспериментальную модель, которая позволяет воспроизвести такой цикл в уменьшенном масштабе, то можно ожидать возникновения ряда явлений, типичных для геохимии экзогенных образований и особенно для процессов разложения горных пород.

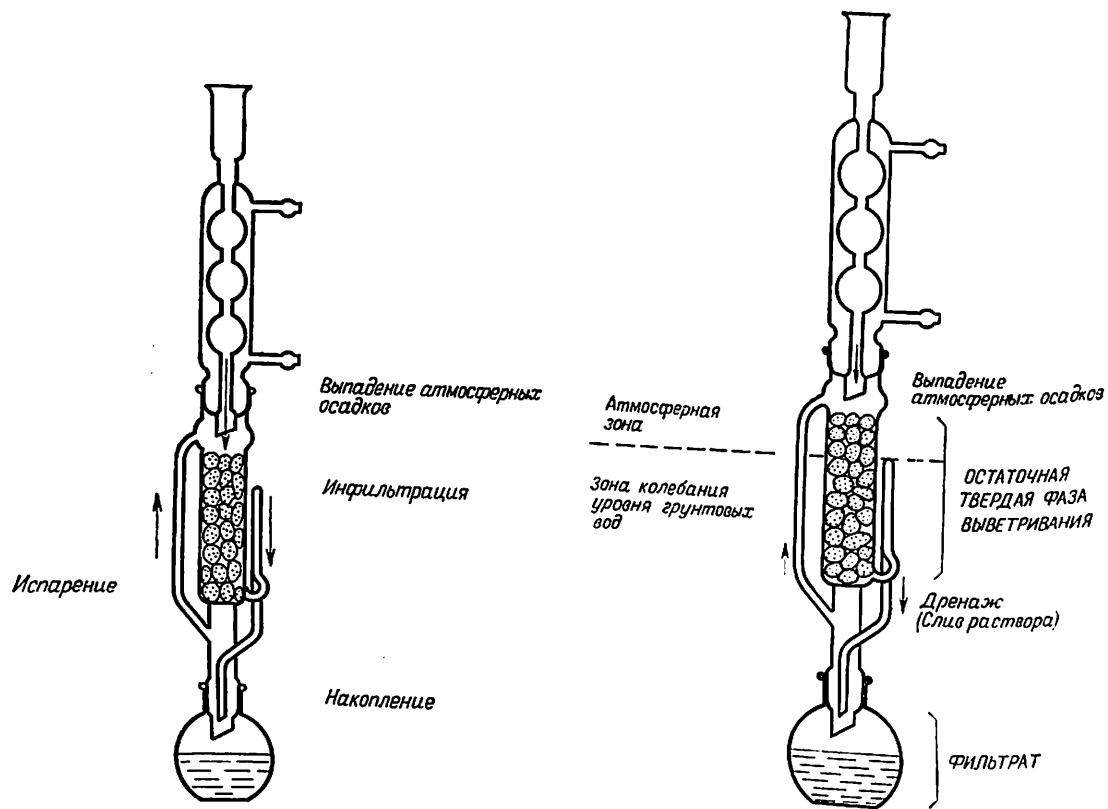
Выбор прибора. Для всестороннего изучения химического разложения пород был выбран простой прибор — экстрактор «Сокслет», который по своим свойствам отвечает всем необходимым требованиям.

1. С точки зрения «гидрологии» такой прибор отлично воспроизводит цикл воды (фиг. 1).

2. С геохимической точки зрения экстрактор «Сокслет» позволяет производить без каких-либо дополнительных приспособлений продолжительное промывание обломков пород, помещенных в главный цилиндр-экстрактор прибора. Благодаря наличию бокового сифона (сливной трубки) в приборе можно отчетливо выделить две геохимические фазы разложения, которые возникают при любом выветривании (фиг. 2):

¹ Так, Бриндли и Радослович [36] получили различные результаты при экспериментах с одним и тем же полевым шпатом (альбитом), но взятым в виде микрокристаллов и в порошке.

а. Твердую остаточную фазу выветривания, находящуюся в главном цилиндре прибора. Она, как правило, состоит из смеси новообразованных минералов, возникших на месте в результате перераспределения вынесенных из породы соединений, а также некоторого количества первичных, еще не разложившихся минералов, в том числе и устойчивых к выветриванию. Эта фаза была названа твердой остаточной фазой выветривания (*reliquat d'altération*)¹.



Ф и г. 1.

Ф и г. 2.

б. Жидкую фазу выветривания, которую можно назвать фильтратом соединения, которые после высвобождения из минералов выносились раствором, фильтровавшимся через породу (фиг. 2).

В нашем приборе фильтрат накапливался в нижней колбе-приемнике, где он постепенно упаривался в результате постоянного подогрева. Кроме цикла воды, т. е. испарение, которое в природе характеризует области бессточных бассейнов.

¹ Термин *reliquat d'altération* (франц.), применяющийся в настоящей работе, соответствует термину *zersatz* (нем.) предложенному Гаррасовицем [123]. Он используется для обозначения тех твердых продуктов, которые остаются на месте, после того как горная порода пройдет стадию поверхностного химического выветривания. В том случае, если разложение породы было полным и твердый остаток целиком представлен новообразованными минералами, автор использует термин «алювиальные минералы», или «алювиат». Первичные минералы породы, уцелевшие в процессе выветривания, образуют устойчивую фазу выветривания, или резистат. Нам кажется целесообразным ввести эти два термина, хорошо отражающих сущность процессов, приводящих к формированию данных образований. — Прим. ред.

Следовательно, используя экстрактор «Соклет», можно на любой стадии экспериментальных исследований подвести геохимический баланс процесса выветривания породы. Для этого достаточно определить составы двух фаз — твердой остаточной и жидкой — и сравнить их с составом первичной породы.

3. С точки зрения «стадийности выветривания», представляющей одинаковый интерес как для литологов, так и для почвоведов, экстрактор «Соклет» вследствие наличия бокового сифона позволил наметить в цилиндре две зоны с различной гидрологической характеристикой:

а. Верхнюю зону, расположенную выше устья бокового сифона. Здесь происходит постоянное увлажнение обломков породы фильтрующимися растворами, но никогда не наблюдается полного обводнения. Таким образом, экспериментальное выветривание минералов происходит в постоянно влажной среде и в контакте с воздухом. Эта зона была названа атмосферной (*zone atmosphérique*).

б. Нижнюю зону, в которой обломки породы периодически полностью погружаются в раствор в моменты поднятия жидкости до устья бокового сифона. Эта зона получила название зоны колебания уровня грунтовых вод (*zone de fluctuation phréatique*). Разложение породы здесь происходит в условиях постоянной смены двух обстановок: полного обводнения и влажной атмосферы (последние условия похожи на условия верхней зоны).

Все вышеизложенное показывает, что экстрактор «Соклет» представляет собой прибор, удобный для моделирования экзогенных процессов. И действительно, он позволяет определенным образом связать различные факторы выветривания (температуру и интенсивность выноса, ритмичность колебания уровня воды в цилиндре и интенсивность дренажа и т. д.). Совместное рассмотрение действия всех факторов очень усложнило бы интерпретацию полученных данных. По этой причине необходимо производить несколько опытов, сочетая в каждом из них ограниченное число факторов выветривания.

Моделирование различных условий опытов. Всесторонний анализ условий поверхностного выветривания помог выделить те параметры, которым принадлежит решающая роль в этом процессе, а именно:

климатические факторы (температура, количество осадков, испарение);

физико-химические и биохимические свойства растворов, которые воздействуют на породы;

биологические факторы, которые в некоторых случаях влияют на процесс выветривания, в особенности в самой поверхностной пленке; петрографический состав первичных пород.

Различные сочетания этих характеристик создают условия для различных типов выветривания на земной поверхности, которые в настоящее время довольно хорошо охарактеризованы с морфологической, геохимической и минералогической точек зрения.

Учитывая все вышесказанное, можно прийти к выводу, что основная цель исследования состоит в попытке экспериментально воспроизвести различные геохимические типы разложения или, как минимум, на первом этапе работы, один из таких типов; затем, изменяя планомерно условия опытов, оценить эффективность различных факторов в процессе выветривания и установить, таким образом, «экспериментальные пределы» возникновения тех или иных образований.

Итак, выбор экстрактора «Соклет» для проведения опытов хорошо согласуется с их конечной целью (за исключением опытов с биологическими агентами), так как он позволяет не только осуществить сразу целый комплекс определенных условий, но и изменять их в широких пределах независимо друг от друга

1. Параметры, связанные с динамикой воды (гидродинамикой), изменить очень легко. Для этого достаточно лишь усилить нагрев под колбой-прием-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	11

ЧАСТЬ 1

Основной эксперимент. Выветривание пород под действием чистой воды

Глава 1. Основные условия опытов	19
Глава 2. Изучение продуктов экспериментального выветривания. Исследование твердой остаточной фазы выветривания	31
Глава 3. Изучение продуктов экспериментального выветривания. Исследование фильтратов выветривания	61
Глава 4. Общая характеристика процессов разложения пород. Роль петрографического состава	77

ЧАСТЬ 2

Экспериментальное выветривание пород в различных условиях

Глава 5. Изменение физико-химических условий. Выветривание в присутствии CO_2	91
Глава 6. Выветривание в присутствии сероводорода и уксусной кислоты	117
Глава 7. Изменение гидродинамических и температурных условий.	136

ЧАСТЬ 3

Общие результаты экспериментальных исследований

Глава 8. Синтез экспериментальных данных о процессе выветривания	155
Глава 9. Об основных принципах почвообразования	183
Глава 10. Экспериментальное исследование и его значение для литологии. Геохимический баланс экзогенных процессов	203
Заключение	218
Приложение	220
Литература	227
Ж. Педро и Ж. Беррье. Об экспериментальном выветривании каолинита и его преобразовании в бёмит под действием воды	237
Ж. Педро. О геохимических особенностях различных зональных процессов, действующих при поверхностном выветривании пород (цикл алюминия — кремнезема)	241
Ж. Педро и Ж. Беррье. Экспериментальное изучение процесса силификации брусита $\text{Mg}(\text{OH})_2$	245
Ж. Педро и Ж. Любен. Об изменении гелей алюмосиликатного состава в условиях постоянной инфильтрации; влияние факторов выветривания на образование бёмита и гиббсита в остаточных продуктах	248

«НАУКИ О ЗЕМЛЕ»
т. 32

Ж. Педро

Экспериментальные исследования геохимического выветривания
кристаллических пород

Редактор М. ЯКОВЕНКО.

Художественный редактор В. Варлашин. Технический редактор Н. Новлева.

Корректор Л. Чучукина.

Сдано в производство 28/V 1970 г. Подписано к печати 17/XI 1970 г. Бумага № 1 70×108/16=
=7,88 бум. л. 22,05 печ. л. Уч.-изд. л. 20,03. Изд. № 5/5284. Цена 2 р. 40 к. Зак. 330.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР», Москва, 1-й Рижский пер., 2

Московская типография № 18 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Москва, Трехпрудный пер., 9