

И. И. ГИЗБУРГ

УЧЕНИЕ О ГИПЕРГЕННЫХ ПРОЦЕССАХ  
В РАБОТАХ А. Е. ФЕРСМАНА

Деятельность Александра Евгеньевича Ферсмана многократно освещалась в литературе. За последние годы особенно подробно рассматривались его работы по пегматитам и по процессам, связанным с глубинами земной коры, но менее обращалось внимания на его работы по процессам поверхностным — процессам гипергенеза. За последние годы не появилось ни одной работы, посвященной значению А. Е. Ферсмана в разработке этих вопросов, несмотря на то, что в целом ряде работ, которые делались в этой области, имя и работа Александра Евгеньевича очень часто упоминались.

Дать обзор работ А. Е. Ферсмана по гипергенным процессам и легко и трудно. Трудно потому, что они разбросаны почти во всех его работах; легко потому, что он изложил их основы в своей знаменитой «Геохимии», особенно в томе II (1934).

Я бы хотел подчеркнуть, что за последние пятнадцать лет работы в области проблем гипергенеза чрезвычайно сильно разрабатывались, и даже в большей степени, чем по проблемам, связанным с глубинными процессами. Исследования целого ряда институтов, — Института геологических наук, Геохимического института, Института нефти АН СССР, Института газа, угля, СОПСа, ВИМСа, ВСЕГЕИ, Керамического института и, наконец, работы по осадочной петрографии, гидрогеологии и солям многочисленных учреждений Министерства геологии и других министерств — в той или иной форме связаны с теми идеями, которые излагал А. Е. Ферсман в своей «Геохимии».

В настоящей статье я попытаюсь охарактеризовать основные идеи Александра Евгеньевича в вопросах гипергенеза и показать, какое развитие они получили в дальнейшем.

У Александра Евгеньевича объем представлений о явлениях, связанных с гипергенезом, не сразу сформировался. В самом начале своей научной деятельности, в 1922 г. в «Геохимии России» он писал:

«Под процессами поверхностного разрушения — гипергенеза мы понимали весь комплекс химических и геохимических явлений, которые протекают на границе между атмосферой и твердой земной оболочкой» ... «Под именем гипергенеза мы будем обозначать все то, что стремится к развитию между лито- и атмосферой, т. е. приводит к образванию почвы или нового осадка».

«Нижние границы этих процессов не могут быть определены с точностью и постепенно явления поверхностного литоморфизма с глубиной переходят в процессы катогенного характера» ... «Надо, однако, иметь в виду, что разбираемому циклу геохимических явлений подвержены не только осадочные, но и изверженные породы, и даже в гораздо большей степени именно эти последние, так как они по условиям образования наиболее далеки от равновесия системы: атмосфера плюс твердая кора. К процессам гипергенеза мы прежде всего относим явления, связанные с образованием почвенного покрова, и все подготовительные стадии к нему...» (стр. 31). Так впервые появился в литературе термин «гипергенез», введенный А. Е. Ферсманом. А через несколько лет он настолько вошел в обиходный научный язык, что Ф. Ю. Левинсон-Лессингу пришлось для своего петрографического словаря сделать специальные опросы о том, кто ввел этот термин в науку.

В первых представлениях о гипергенезе А. Е. Ферсман охарактеризовал это понятие как поверхностное разрушение пород, т. е. то, что мы теперь называем «корой выветривания». Однако в дальнейшем понятие «гипергенеза» у Александра Евгеньевича расширяется. Спустя двенадцать лет, во II томе «Геохимии» он пишет, что... «под геохимией гипергенных поверхностных процессов мы подразумеваем всю совокупность химических превращений и перемещений, происходящих в наиболее наружных частях нашей планеты» (стр. 222). Далее он говорит, что область геохимических процессов гипергенного типа характеризуется сложными химическими и физическими взаимоотношениями между атмосферой, гидросферой и верхними частями литосферы, с исключительным непостоянством определяющих ход реакций, ролью жизненных процессов и процессов технической деятельности человека. Таким образом, понятие гипергенеза, ранее состоявшее из одних факторов поверхностного разрушения, расширяется в совокупность факторов превращений и перемещений.

К гипергенезу, кроме педогенеза, А. Е. Ферсман причисляет еще процессы: 1) собственно гипергенеза, 2) диагенеза, 3) галогенеза, 4) катагенеза, 5) гидрогенеза, 6) механогенеза, 7) биогенеза, 8) техногенеза, т. е. всю совокупность «поверхностных» процессов, противопоставляя им процессы, связанные с магмой и глубинным метаморфизмом.

У нас очень часто наряду с понятием о «гипергенном процессе» употребляется понятие «экзогенный процесс». В чем заключается разница обоих терминов? Я полагаю, что большой разницы нет. Когда мы хотим противопоставлять процесс глубинный, «эндогенный» поверхностному, мы говорим «экзогенный процесс». Таким образом, наряду с термином «гипергенный» существует также термин «экзогенный». Одновременно существует и термин — «поверхностные процессы». В расширенном понимании введенного А. Е. Ферсманом понятия гипергенез — все три термина сливаются в один и серьезной разницы между ними нет. Экзогенный процесс противопоставляется эндогенному, как поверхностный глубинному, а гипергенный тому же — эндогенному. Нам казалось бы целесообразным оставить термин гипергенный — в отношении континентальных процессов разрушения и перемещения вещества и противопоставлять ему морской осадочный процесс или морской гипергенез. Термины же эндогенный и экзогенный процессы вовсе не употреблять и заменить их терминами «поверхностные» и «глубинные» процессы, как общедоступные, более широкие и общие понятия.

А. Е. Ферсман, кроме термина гипергенез, ввел еще термин катагенез. Так в 1922 г. он подчеркивает исключительное значение процессов ката-

генеза и пишет, что до сих пор мало обращали внимания на эту область. В 1934 г. он опять повторяет, что введенный им в 1922 г. термин «катагенез» не получил широкого признания, а между тем огромный цикл геохимических процессов, объединяющихся под этим термином, до сих пор не получил своего освещения («Геохимия», т. II, стр. 294).

Что называет А. Е. Ферсман «катагенезом»? И здесь это понятие со временем у него расширяется.

Если в 1922 г. А. Е. Ферсман катагенезом называл всю совокупность химических образований в осадочной породе после того, как она оказалась отделенной от водного бассейна слоем нового осадка, вплоть до того момента, как она сделалась поверхностью материка (стр. 30), то в 1934 г. катагенезом он называет «совокупность геохимических процессов, вызываемых на границе разнородных минеральных комплексов, свит, пород и т. д.» (стр. 286).

Л. В. Пустовалов указывал на то обстоятельство, что в осадочных породах катагенез весьма слабо развит. А. Е. Ферсман правильно замечает, что это не совсем верно, так как внимательный анализ каждой свиты указывает на наличие частных геохимических реакций на границах разнородных геохимических осадков. Одновременно из общих процессов катагенеза в 1934 г. А. Е. Ферсман выделил процессы миграции растворов на более далекие расстояния от стыка разнородных пород, благодаря чему возникает новый тип минералообразовательных процессов, названных им «гидрогенезом».

Разбирая процессы гипергенеза, А. Е. Ферсман разделяет их на целый ряд групп и отличает «собственно гипергенез» от гипергенеза вообще.

«Собственно гипергенез», или понятие гипергенеза в узком его смысле, в настоящее время отождествляется с процессами образования коры выветривания. Их исследование получило весьма большое развитие и оформилось в виде специальной отрасли знания и вошло в геологию как один из основных элементов континентального развития земли. В настоящее время изучены и исследуются древние коры от допалеозойских до позднечетвертичных. Они расклассифицированы по различным типам. С ними связывается образование целого ряда минеральных месторождений и осадочных пород. Древние коры выветривания стали рассматриваться как геологические формации. Выяснены законы их образования, условия их изменения и наложение на них новых процессов; изучены миграция в них различных элементов, описан целый ряд минералов, которые связаны с этими процессами. Разработана проблема стадийного развития самого процесса выветривания и стадийность выветривания отдельных минералов со слоистой решеткой. В этом отношении то, что А. Е. Ферсман называл «собственно гипергенезом», получило столь большое развитие, что теперь это большая отдельная отрасль минералогического и геологического познания, теоретически интересная и практически важная

«Педогенез». Проблема педогенеза в минералогии получает все большее и большее значение. В настоящее время благодаря работам лаборатории Б. Б. Полюнова и его школы мы знаем ряд минералов, образующихся в результате процессов почвообразования, мы знаем, что образование свободных гидратов глинозема и гидроокислов железа, а также кремнезема связаны в ряде случаев с почвенными процессами. За последнее время имеются данные, которые доказывают, что образование глин, водных алюмосиликатов, пока еще недостаточно выясненного состава, возможно также в результате почвообразовательной деятельности. В этом отношении интересны последние работы, которые были проведены в Москве и Ленинграде. Отрасль науки по изучению минералов,

связанных своим образованием с почвенными процессами, повидимому будет дальше все развиваться и даст много нового. Образование опала, халцедона и кварца в форме фитолитарий надо считать теперь доказанным. Доказано также образование в почвенных процессах водных силикатов и карбонатов магния.

Не всегда образование кварца, глины или других минералов можно объяснить одними почвообразовательными процессами, но выделить эти случаи и изучить их представляет и теоретическую и практическую важность. В будущем как будто бы намечается развитие особой «почвенной минералогии» в дополнение к «почвенной геохимии», материалы для создания которых все больше и больше накапливаются.

Очень большое значение приобретают процессы, связанные с «катагенезом». Речь здесь идет не только об «осадочных процессах», как за последнее время это стал писать А. Е. Ферсман после работ Л. В. Пустовалова, а о еще более широком круге процессов, в особенности если рассматривать «гидрогенез» как частный случай катагенеза. Напомним, что процессы окремнения, вторичной доломитизации разложения силикатов и т. д., ионный обмен среди осадочных пород, обменные реакции между водой пронизывающей породы, и вмещающими ее породами, образование водных силикатов являются катагенными процессами. К процессам катагенеза следует отнести отчасти нефтеобразование и образование бурых и каменных углей. Сюда же относятся частично и процессы метаморфизма глинистых образований, превращение их в аргилиты и ряд изменений в их составе. К собственно «гидрогенезу» придется, согласно нашему мнению, отнести более узкий круг вопросов, связанный непосредственно с самими водами, как, например, метаморфизм морских вод, ранее включенных в осадочные толщи, а затем изменивших свой состав в процессе миграции и взаимодействия с окружающими породами и инфильтрационными водами атмосферного происхождения. Постепенное замещение древних погребенных вод пресными инфильтрационными и создает на глубине зональное расположение вод различной минерализации. Таким образом, зональность, характерная для процесса гипергенеза, имеет место и на глубине в форме различного состава подпочвенных вод. Состав вод верхних, нижних и глубинных горизонтов разный: от мало минерализованных верхних вод — гидрокарбонатно-кальциевых — к щелочным или сульфатным водам средней минерализации и к соленым водам высокой минерализации.

А. Е. Ферсман был прав, когда он указывал, что катагенным процессам следует уделять больше внимания, чем это делается до сих пор, — их необходимо изучать более детально. Мы не сомневаемся в том, что целый ряд месторождений полезных ископаемых (не говоря уже о минеральных водах) при внимательном исследовании окажется связанным с этими процессами.

А. Е. Ферсман ввел понятие «механогенез». Это процессы образования россыпей благородных металлов и редких минералов. Раньше представлялось, что россыпи эти — чисто механические осадки. Александр Евгеньевич еще шестнадцать лет назад указывал, что чистого механогенеза не существует, что он всегда одновременно связан с процессами химическими, что наряду с ним идут процессы геохимические. Новейшие исследования благородных металлов в россыпях полностью подтвердили его предположения.

А. Е. Ферсман подчеркнул, что механогенез облегчает химию дальнейших процессов, что он сам зависит от химизма вмещающих пород и ведет к дальнейшим геохимическим процессам. Он пишет, что,

«...в сущности говоря, мы даже не вполне знаем границы чистого механикогенеза и тех настоящих химических и кристаллохимических превращений, которые им сопутствуют». Им подчеркивается, что «ни золото, ни платина не остаются без изменения в песках или в конгломератах и что возникновение самородков или накопление этих металлов в определенных частях плотиков является не чисто механическим, а химико-механическим процессом» (1934, стр. 295).

В настоящее время мы знаем, что облагораживание золота в россыпях, каемки более высокопробного золота в самородках, образование горчичного золота и т. д. являются именно результатами подобного физико-химического процесса. Точно так же часть рудных столбов в зонах окисления образовались тоже в результате гипергенных геохимических процессов. Мы также знаем, что не только золото в россыпях изменяется; часто и гальки в этих россыпях не остаются такими, как они отложились, а в ряде случаев они размягчаются и резко меняют свой состав.

«Б и о г е н е з». А. Е. Ферсман уделяет биогенезу большое внимание, ссылаясь на работы В. И. Вернадского и А. П. Виноградова. СССР является родиной, где изучение химизма биогенных процессов получило максимальное развитие. Этим процессам уделено огромное внимание Владимиром Ивановичем Вернадским, продолжателем которого является А. П. Виноградов.

В области биогеохимии сделано очень многое. Биогеохимия стала отдельной отраслью геохимии. Существует специальный институт, который уделяет большое внимание этой отрасли геохимии (Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского). В настоящее время мы не только знаем среднее содержание химических элементов в почвах и организмах, но и геохимическое отношение, установившееся между средой и организмом. Изучены организмы концентраторы отдельных элементов, а также разделение организмами пар близких друг к другу элементов, выяснено наличие биогеохимических провинций, разрабатываются методы биогеохимических поисков и т. д. Вопросы, поднятые в свое время учеником В. И. Вернадского — Я. В. Самойловым о «блоритах», получили дальнейшее развитие в работах ряда советских ученых.

Вообще в области биогенеза сделано очень многое, и достигнуты столь значительные успехи, что мы в этой области занимаем первое место в мире.

Очень сложный вопрос поднял Б. Б. Польшов, называя «стерильной геохимией гипергенных процессов» ту, которая полностью отрицает значение жизнедеятельности организмов в процессах гипергенеза и всю ее связывает с физико-химическими реакциями. Б. Б. Польшов утверждал, что нельзя одними физико-химическими реакциями объяснить те или другие процессы, которые совершаются при гипергенезе, в частности в области выветривания.

В его лаборатории (Институт почвоведения АН СССР) при изучении почвы выделены некоторые отдельные минералы, образованные жизнедеятельностью организмов (фитолитарии кремнезема и др.). Доказано влияние лишайников на разложение силикатных пород и т. д. Имеется ряд других работ, появившихся особенно за последние 10—15 лет, которые в той или иной форме иллюстрируют влияние макро- и микроорганизмов на гипергенные процессы разложения пород и концентрации отдельных элементов. Поэтому в настоящее время следует учитывать, что целый ряд процессов разложения и образования минералов, в особенности на поверхности и вблизи ее, не является чисто стерильным и связан

с биологическими факторами. Но это не значит, что все подобные гипергенные процессы обязаны своим образованием одним биологическим факторам, и только им одним.

Однако даже в случаях несомненного участия биологического фактора остается до настоящего времени неясной физико-химическая сторона этого процесса. Как из полевого шпата плюс биопроцесс получается каолин — неясно. Еще большие трудности возникают, когда мы переходим к процессам разложения и минералообразования на глубине. Здесь приходится подозревать невидимые невооруженным глазом бактериальные организмы. Последние, несомненно, могут играть большую роль даже на больших глубинах. Ведь мы же знаем наличие бактериальных процессов в водах на глубине 1—2 тыс. метров. Но одновременно нельзя не подчеркнуть, что с глубиной роль микроорганизмов уменьшается и стерильность процессов увеличивается.

Александр Евгеньевич уделял внимание и процессам гипергенеза рудных месторождений. Он выделял шесть основных черт геохимических процессов: 1) сильное окисление сульфидов, 2) образование кислотных растворов, 3) подвижность катионов в кислой среде, 4) гидратацию соединений, 5) вертикальную зональность с образованием поверхностной коры выветривания и зоны обогащения и 6) зональность железной шляпы и ее геохимические особенности.

В отношении зоны окисления за последние годы сделано очень много. Прежде всего следует упомянуть о работе С. С. Смирнова «Зона окисления сульфидных месторождений» (1951), в которой даны краткие и четкие характеристики минералов и процессов зоны окисления. Многого было сделано за последние годы Институтом геологических наук (Ф. В. Чухров и И. И. Гизбург), также институтом Нигризолото, Уральским филиалом АН СССР, институтами Министерства геологии и др. В краткой обзорной статье слишком мало места для того, чтобы останавливаться на результатах всех этих работ.

В настоящее время мы рассматриваем зоны окисления как частный случай процессов выветривания вообще и древнего в особенности. Мы знаем что зоны окисления обычно опережают процессы выветривания, хотя и неотделимы от них. Это вызывается более быстрым разложением сульфидов, чем силикатов. В зонах окисления сульфидов мы имеем кислое выветривание, а в кроющих и вмещающих их толщах — нередко щелочное. Благодаря этому профиль выветривания во вмещающих породах получается обратный нормальному. Вместо уменьшения кислотности книзу, мы имеем ее увеличение. Теоретически каолины должны залегать сверху, а гидрослюды и монтмориллониты — книзу; в зонах же окисления вблизи сульфидов развиваются охры и каолины, а гидрослюды и монтмориллониты — вдали от сульфидов, в верхней части профиля. Состав образующихся продуктов окисления может часто давать указание на состав сульфидов и может служить отличительным признаком от продуктов, образующихся при выветривании пород, лишенных сульфидов. На этом основании нами разработаны поисковые критерии для отличия одних продуктов выветривания от других.

Процесс сингенеза. В настоящее время в этой области сделаны большие успехи, в особенности благодаря работам петрографов-осадочников (Батурий, Страхов, Теодорович, Пустовалов и др.). Детальное минералогическое изучение осадочных пород раскрывает чрезвычайно глубокие процессы геохимического порядка. Достаточно указать на установленную зависимость типа минералообразования от расстояния до береговой линии, на обнаруживание ряда цеолитов в определенных гори-

зонтах морских осадков, приуроченность к определенным горизонтам стронцианита, ратовкита, барита, иногда галенита, на процессы разложения одних силикатов с образованием других и т. д.

Геохимия осадков и их минералогия вырастают в большую и серьезную отрасль знания с блестящими перспективами и практически важными выводами.

А. Е. Ферсман уделял большое внимание не только геохимическим процессам, которые совершаются в верхних горизонтах земной коры, но стремился указать и основные физико-химические факторы, которые ими управляют. Он выделял роль и значение следующих факторов: давление и температура, агрегатное (фазовое), также коллоидное состояние вещества, поглощенный комплекс рН, кислородный потенциал, наличие мутабельных соединений, факторы биогенеза, затем климатические факторы и климатическую зональность.

Остановимся на развитии изучения этих факторов после выхода в свет II тома «Геохимии». А. Е. Ферсман указывает, что не следует полагать, будто процесс гипергенеза ограничивается одними или несколькими атмосферами давления; оно может достигать трехсот атмосфер. На первый взгляд, это утверждение может казаться много преувеличенным, но то, что давление при гипергенезе не ограничивается несколькими атмосферами — это несомненно. Укажем, что давление в 300 атм. соответствует столбу жидкости в 3000 м, что близко к средней глубине океана; оно же соответствует примерно 1,5-км толще пород, что в настоящее время легко достигается бурением.

Надо указать еще на одно явление, мимо которого обычно проходят. При изучении коры выветривания или процессов карстования отмечается, что их современное положение относительно уровня моря не соответствует положению абсолютной отметки при их образовании. Древние коры выветривания вследствие эпейрогенических колебаний или погружаются или повышаются, причем эти колебания достигают 200—300 м. Есть случаи чрезвычайно любопытные, когда на брусите образуется пироаурит и когда этот пироаурит подвергается в дальнейшем превращению в хлорит и тальк, при полном сохранении формы пироаурита. Образование самого брусита требует весьма низкого парциального давления углекислоты, которое соответствует почти ее полному отсутствию. Это приблизительно будет иметь место на отметках 180—250 м ниже уровня поверхности, когда углекислота почти полностью поглощена вышележащими горизонтами. Некоторое повышение содержания углекислоты в силу поднятия местности ведет к образованию артинита  $[MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O]$ , а дальнейшее повышение и в связи с этим увеличение количества углекислоты в грунтовых водах ведут к образованию гидромагнезита —  $3MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$  и т. д.

Точно так же гипергенный процесс переходит в катагенный, а последний может перейти в гипергенный. Эрозия и эпейрогенические колебания вызывают многократные переходы одних процессов в другие.

Несомненно, что в глубинных частях коры выветривания мы имеем дело с давлениями более одной атмосферы, с десятками и более атмосфер. Вместе с глубиною происходит усиление влияния температурного фактора. Отметим, что на глубине 300 м мы имеем увеличение температуры примерно на  $10^\circ$  (геотермический градиент), что почти вдвое усиливает кинетику химических реакций. Это все же, понятно, не гидротермальный процесс, а гипергенный. С подобным увеличением температур в зонах гипергенеза и катагенеза на некоторой глубине приходится считаться.

Очень большое значение А. Е. Ферсман придает агрегатному (фазовому) состоянию вещества, участвующего в процессах, т. е. соотношению

твердой, жидкой и газообразной фаз друг с другом. Он подчеркивает значение водного равновесия и считает его роль совершенно исключительной. Он цитирует В. И. Вернадского, выделяющего 44 гидрофильных элемента.

Если водная фаза определяет характер гипергенных растворов, то значение газовой фазы, несомненно, еще выше, так как влияние этой фазы не ограничивается одной зоной гипергенеза, но проникает и глубже. Подчеркивая роль и значение дисперсных систем коллоидного состояния вещества, он останавливается преимущественно на почвообразовательных процессах. Несомненно, дисперсно-коллоидные системы играют важную роль не только в почвообразовательных процессах, но и в гипергенных, и обуславливают их направленность, структуру и текстуру образующихся минералов и пород. После выхода II тома «Геохимия» коллоидно-дисперсной минералогии и геохимии посвящено немало работ (Ф. В. Чухров, И. Д. Седлецкий, Н. И. Антипов-Каратаев и др.). Но поскольку мы еще находимся здесь в стадии накопления материала, то и полное обобщение его с выделением особой минералогии коллоидно-дисперсных минералов пока из-за недостаточной изученности является преждевременным.

Следует отметить, что за последние годы развились: рентгеноструктурный анализ, люминесцентный, весьма тонкий механический анализ (центрифугальный), а также электронная микроскопия, тонкие приемы иммерсии, окраски и пр. — все это позволяет изучать гипергенные минералы размером до 1—2  $\mu$  и много меньше. Таким образом, тонкодисперсные минералы могут быть теперь изучены более подробно, чем они изучались раньше. Параллельно с этим развивается физико-химия поверхностных реакций. Все это может помочь дальнейшему углублению этой области минералогии и геохимии, на чем особенно настаивал А. Е. Ферсман, и мы можем только присоединиться к его призыву тщательно современными методами изучать коллоидные дисперсные минералы и геохимию связанных с ними процессов.

А. Е. Ферсман обращал также большое внимание на обменные реакции и поглощенные основания. Обменной катионной реакцией он объясняет целый ряд примесей, которые находятся среди современных и древних продуктов гипергенеза. Ему принадлежит следующая формулировка процесса: та часть поглотительного комплекса почвы, которая состоит из дисперсного кристаллического вещества, при поглощении, замещении и увеличении количеств отдельных катионов меняется в порядке пропорциональности радиуса ионов извлекаемых или замещаемых веществ.

В настоящее время можно считать правильной мысль, что поглощенные комплексы имеют большое значение не только для почвы глин, но и для рудных минералов, особенно для минералов зон окисления: гидроксидов марганца и железа, кремнезема, ряда фосфатов, арсенатов и пр. Среди минералов зоны окисления мы имеем целый ряд поглощенных ими металлов, вплоть до благородных. Это еще область будущих изысканий, так как работы по этой проблеме лишь начаты; но и сейчас мы подходим к этому вопросу уже не так, как подходили раньше. Сейчас мы не ограничиваемся уже тем, что при расчете анализов — например глин — мы всю целочность соединяем в слюду, а предварительно определяем количество ее поглощенной части. Методы электролиза и чисто химические позволяют выделить уже целый комплекс поглощенных металлов, а исключительно чувствительные методы калориметрического и полярографического анализа — количественно их определить даже в массовых масштабах. Ука-



жем, как пример, на интересные случаи нахождения за последнее время на платформе Русской равнины — вдали от каких-либо изверженных пород и термальных источников — примеси многочисленных металлов в осадочных породах (в глинах, особенно в гидрослюдистых монтмориллонитового состава), вплоть до свинца, меди, цинка, серебра, никеля, кобальта и др.

Изучение поглощенного комплекса не только в почвах и в глинах, но и в применении к некоторым типам рудных месторождений, теперь начинается, хотя и с трудом, но все-таки развиваться и, несомненно, будет иметь значительный успех. И здесь основные положения, которые дает А. Е. Ферсман, долго будут служить руководящими.

А. Е. Ферсман один из первых обратил внимание на значение концентрации водородных ионов. Но до сих пор в этом отношении среди научных работников господствуют разные и даже неправильные мнения. А. Е. Ферсман указывал на  $pH$  в п а д е н и я отдельных окислов, но никогда не писал, что  $pH$  суспензии или водных вытяжек соответствует  $pH$  выпадения. К сожалению, ряд исследователей определяет  $pH$  водных вытяжек и суспензий и приравнивает результат измерений к  $pH$  образования пород и руд. Точно так же неправильно определение  $pH$  при обычных низких температурах переносить на высокотемпературные процессы. Однако при изучении современных процессов в почвах, озерах, морях  $pH$  является необходимой и весьма существенной величиной, критерием степени кислотности и щелочности совершающихся процессов. Следует также обратить внимание на идеи А. Е. Ферсмана по к р и с т а л л о х и м и ч е с к о й компенсации, т. е. «если ион А замещается другим бóльшим ионом В, то этому процессу содействует вхождение третьего меньшего иона С, так что С как бы уравнивает увеличенный объем В».

Большое значение имеют работы, которые А. Е. Ферсман начал еще давно, лет сорок назад (1913), относительно «мутабильных соединений». Он писал, что, кроме минералов со стехиометрическими отношениями окислов друг к другу, существуют минералы непостоянного, промежуточного, колеблющегося состава. Впервые он это отметил, когда изучал магнезиальные силикаты. Все, кто изучает магнезиальные силикаты, знают, как трудно их классифицировать. В настоящее время исследователи, вооруженные новейшей техникой и целым рядом новых методов, нередко затрудняются, куда отнести тот или иной магнезиальный силикат. Тем более это было трудно сделать А. Е. Ферсману в 1913 г. Приходится лишь удивляться, как гениально он все же нащупал правильные пути их классификации. Минералы колеблющегося состава и свойств при сохранении их однородности А. Е. Ферсман назвал «мутабильными» соединениями. В этом отношении он положил начало ряду дальнейших исследований. Мутабильные соединения в настоящее время представляют собой целую группу минералов, существование которых обусловлено разнообразными причинами. К ним относятся: минералы, образующиеся в виде диссоционных систем, смешанные решетки продуктов постепенного окисления, гидратации и неравномерного замещения, продукты радиоактивного распада, твердые растворы и т. д. Особо выделяются группы «стадийных минералов», являющиеся переходящими стадиями от одних минералов в другие в результате постепенного развития процессов окисления, гидратации и выщелачивания. Кристалл при этом в ряде случаев на первое время остается неизменным, затем затрагиваются одни пакеты кристалла, а другие остаются неизменными (образование так называемых смешанных кристаллов). В пределах отдельных пакетов процессы изменения влияют в ряде случаев раньше на одни

элементы, затем на другие и т. д. Однородность минералов остается при этом ненарушенной, а оптические свойства и удельные веса все время подвергаются изменению. Хотя в настоящее время мы в состоянии проследить целый ряд изменений, которые совершаются в минералах, а также можем представить себе перегруппировку строения кристаллической решетки, но все же проблема мутабельных соединений находится пока еще в начальной стадии своего развития.

И если нам удалось бы моделировать разрушение решетки и формы ее перехода в другую, то это было бы огромным шагом вперед.

В этом отношении кристаллохимия и идеи, которые высказал А. Е. Ферсман, могут нам дать очень многое.

А. Е. Ферсман подчеркивал необходимость изучения кислородного потенциала, он указывал, что на больших глубинах то или иное содержание кислорода отражается на минеральном составе образующихся осадков. В настоящее время значение кислородного потенциала выходит за рамки одних осадочных образований. В этом отношении заслуживают внимания работы А. Г. Бетехтина, устанавливающие зависимость между парциальным давлением кислорода и серы на разных глубинах при образовании гидротермальных месторождений. Наиболее эффектно влияние кислородного потенциала можно проследить на вынадеии марганцевых минералов на разных глубинах в разном расстоянии от морского берега (см. выше), а также на окисление марганцево-железистых фосфатов (С. П. Попов, Ф. В. Чухров, А. И. Гинзбург).

А. Е. Ферсман уделял большое внимание зональному расположению гипергенных минералов. Почвенную широтную и высотную зональность, которая давно была установлена русскими почвоведом—В. В. Докучаевым и его школой, А. Е. Ферсман распространил гораздо шире и на ряд других геохимических процессов. Им подчеркивалось, что образование коллоидов и постепенный ряд превращений растворов—золи — гели — кристаллоиды — находятся в тесной зависимости от всего климатического режима и обуславливают зональность гипергенных процессов. Широтная зональность геохимических процессов относится к важнейшим, еще далеко не оцененным по своему значению факторам. К основным факторам геохимической зональности А. Е. Ферсман относил: 1) направление почвенных растворов, 2) смену величин рН, 3) различие в количествах воды и концентрации растворов, 4) различие в судьбе гумуса и продуктов гниения и окисления, 5) различие в судьбах миграции глинозема, кремнезема и окислов железа, 6) различие в соотношениях скоростей механического разрушения и химического гипергенеза, 7) различие в инсоляции, 8) интенсивность механических и биохимических факторов.

В настоящее время показано, как эти различия отражаются на профилях выветривания, различных для разных широт и высот и для разных материнских пород, а также на фациальной зональности осадков на дне водоемов. В этой области за последние годы сделано очень много; особенно хорошо разработана зональность кор выветривания. В настоящее время мы отмечаем не только зональность в вертикальном разрезе, но выделяем и ряд особых провинций, отличающихся своим химическим и минералогическим составом. Этим геохимическим гипергенным провинциям в ряде случаев соответствуют концентрации определенных рудных минералов. В результате образуются гипергенные рудные провинции, а также характерный гидрогеологический химический режим и соответствующий ему растительный покров. Б. Б. Полюнов назвал подобные провинции «геохимическим ландшафтом». Под этим термином он понимал

всю совокупность химических процессов, которые совершаются водой, газами, грунтовыми водами и биогенными факторами, которые на поверхности обусловили ландшафт, а на глубине — направление геохимических реакций. Все это является дальнейшим развитием идеи зональности, о которой А. Е. Ферсман говорил как об очень важном понятии.

Наконец, А. Е. Ферсман детально разобрал проблемы химических и гипергенных фаций. Он выделял: рудную, озерную, пустынную и другие фации. Исключительно интересной иллюстрацией этих фаций является зональное распределение осадков разного мипералогического состава по удалении от береговой линии: переход различного состава фаций окисных соединений в карбонатные, а затем сульфатные или силикатные фации.

Идеи А. Е. Ферсмана, каждая его мысль находят свое отражение в работе наших научных учреждений и отдельных лиц, они все больше развиваются и расширяются. А. Е. Ферсман обращал внимание на сингенез осадочных пород и объяснял слоистость периодическим изменением состава накаплиющихся осадков. В настоящее время идея об осадочном ритме пополняется для ряда случаев другими взглядами, связанными с хроматографическим разделением ионов, находящихся в растворах, с чисто сорбционными процессами или ионным обменом.

Я коротко пытался изложить основное содержание взглядов А. Е. Ферсмана, которые он высказывал в главах своей «Геохимии» и других работах, посвященных гипергенезу, а также показать, какое дальнейшее развитие получили его взгляды в настоящее время у нас в Советском Союзе. Большая часть этих работ развивается его учениками, сотрудниками и друзьями, а также учениками и сотрудниками его учителя В. И. Вернадского. Мы все стараемся развивать как можно глубже мысли А. Е. Ферсмана и собрать фактический материал для дальнейшего развития его идей. Нам всем, конечно, далеко до полной разработки всех идей и направлений, так широко намеченных в трудах А. Е. Ферсмана, но все же за последние 10—15 лет работы, ведущиеся по этим направлениям в институтах Академии Наук, а также Министерства геологии и других ведомств, на различных кафедрах университета и институтов, настолько далеко продвинулись вперед, что проблемы гипергенеза в СССР в настоящее время разработаны глубже, шире и основательнее, чем в других странах мира. Все эти работы в той или иной форме развивают и уточняют идеи А. Е. Ферсмана и желательно, чтобы его труды о гипергенезе были бы переизданы и дополнены новыми работами, которые сделаны в этом направлении за последние 10—15 лет. После «Геохимии» А. Е. Ферсмана не появилось ни одной общей сводной работы по гипергенезу. Подобная работа чрезвычайно необходима. Она должна объединить все новейшие наши достижения в области гипергенеза, намеченные трудами крупнейших русских и советских ученых—В. В. Докучаева, В. И. Вернадского, А. Е. Ферсмана.