

В. М. ЦИБУЛЬЧИК



ПОВЕДЕНИЕ ТИТАНА  
В КОРЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ  
МЕТАМОРФИЧЕСКИХ  
ПОРОД



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ТРУДЫ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ  
Выпуск 105

В. М. ЦИБУЛЬЧИК

# ПОВЕДЕНИЕ ТИТАНА В КОРЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

*Галина Губокофтанская  
Александре Волоховой -  
благодарностью за  
замечания ценные  
Примечательный автор  
В. М. Ц.*

*- с Губокой  
напомню в работе,  
и ценные замечания  
оформить*

*советы*

*21.03.72.*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
МОСКВА 1972

Впервые для Западной Сибири подробно изучено поведение титана в коре выветривания метаморфических пород и связанных с нею глинах и бокситах (на примере Барзасского района Кемеровской области; северная часть Кузнецкого Алатау). Поведение этого элемента рассмотрено в связи с геохимическими родственными элементами — гидролизатами (Al, Nb, Ta, Th) и железом. На базе большого аналитического материала, обработанного с применением методов математической статистики, выяснено влияние первичных форм нахождения титана в исходных породах на формы его нахождения и характер распределения в продуктах выветривания. Установлено, что присутствие значительной массы титана в собственной минеральной форме (ильменит, рутил) является причиной ослабления геохимической взаимосвязи этого элемента с элементами-гидролизатами и железом в процессе выветривания титана для познания условий образования изученных бокситов. Показано, что титановый модуль ( $TiO_2 : Al_2O_3$ ) совместно с геологическими данными может служить геохимическим критерием в решении вопроса происхождения бокситов. Обсуждены также условия формирования высоких концентраций титана в коре выветривания. Предложен метод извлечения мелкозернистых титановых руд из тонкодисперсного выветрелого материала, могущий иметь большое практическое значение. Табл. 31. Библ. 138 назв. Илл. 38.

Ответственный редактор

член-корр. АН СССР Ф. Н. ШАХОВ

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена изучению поведения титана в коре выветривания метаморфических пород и связанных с нею бокситах и глинах в Барзасском районе Кемеровской области (северная часть Кузнецкого Алатау). Поведение этого элемента рассмотрено в связи с геохимически родственными ему элементами-гидролизатами<sup>1</sup> (Al, Nb, Ta, Th) и железом. Поставлена задача выяснить влияние первичных форм нахождения титана в исходных породах на формы его нахождения и характер распределения в коре выветривания, бокситах и глинах. Кроме того, рассмотрена роль поведения титана для познания условий образования изученных бокситов. Обсуждены также условия формирования высоких концентраций титана в коре выветривания и возможности их промышленного освоения. Аргументация поставленных задач в связи с результатами предыдущих исследований содержится в главе I.

В Барзасском районе кора выветривания имеет нижнемеловой возраст и развита главным образом на докембрийских метаморфических породах (амфиболитах). Общая протяженность полосы распространения коры выветривания около 75 км при ширине от нескольких сотен метров до 2—4 км. В пределах этой полосы наиболее изучены четыре смежных участка (с юга на север, рис. 1): Еденисский, Суховской, Глухаринский и Гавриловский. В 1958—1961 гг. на этих участках Западно-Сибирским геологическим управлением (ЗСГУ) были проведены геологоразведочные работы, в результате которых установлены и оконтурены зоны с высоким содержанием двуокиси титана в коре выветривания. Эти участки послужили объектами исследований.

Работа основывается на исследованиях автора, проводившихся в лаборатории геохимии редких элементов Института геологии и геофизики СО АН СССР с 1958 г. До 1965 г. автор занимался изучением титаносодержащих кор выветривания в Барзасском районе в связи с выяснением генезиса и источников питания титано-циркониевых россыпей. После 1965 г. были проведены специальные исследования по изучению поведения титана в коре выветривания, бокситах и глинах.

Кандидаты геолого-минералогических наук Г. В. Нестеренко, Н. А. Росляков, Е. И. Евдокимов сделали ряд ценных критических замечаний по работе, которые были приняты автором. При выполнении минералогических исследований автор учел полезные советы младшего научного сотрудника Н. А. Кулик. Большая помощь при проведении многочисленных химических определений изучаемых элементов была оказана кандидатом химических наук В. М. Дорош и младшим научным сотрудником А. В. Сухаренко.

В ходе исследований автор постоянно пользовался советами и замечаниями кандидата геолого-минералогических наук А. А. Мигдисова.

<sup>1</sup> К элементам-гидролизатам относятся: Ti, Al, Ga, Zr, Hf, Nb, Ta, Th. Химические свойства этой группы элементов и их геохимическая история в осадочных породах описаны в работе Роновой А. Б. и Мигдисова А. А. [103].

Неоценимая помощь в решении вопроса об обогащении титаноносных кор выветривания была оказана заведующим лабораторией разделения минералов С. И. Голосовым, старшими научными сотрудниками В. И. Молчановым и В. М. Кляровским.

Значительная работа по подготовке исходного каменного материала к минералого-геохимическим исследованиям, проведению количественно-минералогических подсчетов и окончательному оформлению рукописи выполнена В. А. Масловым.

Всех этих товарищей автор благодарит за помощь в работе.

Особую признательность и благодарность за научное руководство работой автор приносит члену-корр. АН СССР Ф. Н. Шахову.

## ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Литература, характер выветривания и глинистых продуктов ее переотложения (бокситов, глин), обширна. Однако вопросы геохимии титана в ней освещены слабо. Специальные работы в этом направлении появились лишь в последнее время. В настоящей главе предпринята попытка по литературным данным в общих чертах изложить состояние проблемы геохимии титана в процессе формирования продуктов выветривания. Кроме того, здесь же характеризуется состояние изученности выветривания и генетически связанных с нею бокситов и глин в исследованном районе. На основании изложенного материала формулируются основные задачи проведенных исследований.

**Поведение титана в коре выветривания**

Одной из первых публикаций, характеризующих поведение титана при выветривании, является работа Б. Б. Полюнова и Л. Б. Тумилович «Титан в коре выветривания» [89]. В ней определяются условия миграции титана в процессе формирования продуктов выветривания. Отмечается, что устойчивость к выветриванию разных природных соединений титана различна. Наиболее легкому разрушению подвергаются титано-силикаты и другие соли комплексных кислот, в радикал которых входит титан, а также титанаты кальция. Более устойчивыми являются титанаты железа типа ильменита и кристаллические формы двуокиси титана. При разрушении в коре выветривания сложных титан-минералов титан выпадает в форме гидроокиси  $TiO_2 \cdot nH_2O$ . В дальнейшей судьбе гидроокиси титана авторы намечают три возможных пути: 1) часть гидроокиси, теряя воду и кристаллизуясь, через стадию анатаза (брукита) превращается в вадозный рутил; 2) другая часть, подвергаясь реакциям коллоидного синтеза и образуя коагелы и адсорбционные соединения, дает начало вадозным минералам типа титанатов и более сложных соединений (чевкинит); 3) некоторая часть, переходя в коллоидальный, а частично, может быть, и в молекулярный раствор, выносятся из коры выветривания водами.

Согласно этим исследователям, титан в коре выветривания наиболее подвижен в форме низших степеней окисления. Основная масса этого элемента в процессе выветривания остается в форме весьма устойчивых первичных (рутил, ильменит) и вторичных (вадозный рутил) минералов. Мнение авторов о том, что распространение титана в коре выветривания становится менее локализованным и более рассеянным, чем в первичных массивных породах, не совсем верно. В работах последнего времени определенно устанавливается, что титан в коре выветривания не только рассеивается, но также концентрируется иногда в значительных размерах (в 3—4 и более раза) по сравнению с содержанием в исходных породах [15, 24, 25, 76, 116].

Основные черты геохимической истории титана в земной коре, установленные на основании ограниченного к тому времени фактического материала, изложены В. И. Вернадским в «Заметке о титане в биосфере» [19]. Тем не менее ряд положений этой работы относительно поведения титана в поверхностных условиях земной коры представляет несомненный интерес. Отмечается слабая химическая активность титана в поверхностных условиях и отсутствие геохимической связи этого элемента с другими, за исключением алюминия. Явления рассеяния титана в этих условиях не установлены. Миграция титана в истинных растворах при гипергенезе отрицается. В связи с этим следует привести замечание В. И. Вернадского, «...что нет ни одного титанового минерала в биосфере, который выделялся бы в ней из водного раствора (как выделяются, например, кальциты и кварц). Вадозные минералы титана, находящиеся в ней, являются нерастворимыми соединениями, выпадающими, по-видимому, из солей как гели, а не из обычных растворов, или связанными с псевдоморфозами» [19, стр. 292]. Очень большая роль в миграции титана в поверхностных условиях признается за такими малонисследованными вадозными титановыми минералами, как лейкоксены и ксантитаны. В. И. Вернадский, например, полагает, что высокие содержания титана (до 10% и больше) в каолиновых глинах, почвах, бокситах, латеритах могут быть связаны с присутствием в них именно ксантитанов. Выясняя причины столь высоких содержаний титана в указанных гипергенных образованиях, он пишет: «Часть этого титана может быть отнесена за счет примесей ильменита, рутила, сфена, т. е. кристаллов титановых минералов детритового характера, но нет никакого сомнения, что это очень распространенное объяснение неверно, не может отвечать всему явлению — очень важному в коре выветривания и, можно сказать, совсем научно не изученному. Обычно эти примеси в нужном количестве не находятся при проверке» [19, стр. 297]. Кроме того, в этой работе В. И. Вернадский допускает значительную роль в гипергенной миграции титана комплексных титано- и титаноалюминиевых соединений.

В многочисленных трудах известного советского исследователя, одного из основоположников учения о древних корах выветривания И. И. Гинзбурга сведения по геохимии титана в процессах гипергенеза весьма скудные. Так, в его известной монографии по древним корам выветривания на ультраосновных породах Урала [24, 25] имеются данные о несомненной концентрации в коре выветривания  $TiO_2$  совместно с  $Al_2O_3$ . При изучении коры выветривания на серпентинитах Айдербаковского массива было показано, что чем порода более выветрена, тем больше в ней находится двуокиси титана в растворимой в соляной кислоте форме. Автор полагает, что растворимая часть  $TiO_2$  находится в форме геля, из которого возможно образование аутигенных форм рутила.

Разнообразный материал по геологии, минералогии и геохимии кор выветривания, распространенных как в СССР, так и за рубежом, публикуется в сборниках «Кора выветривания». Однако в вышедших с 1952 г. девяти сборниках этого издания нет ни одной работы, посвященной изучению геохимии титана в коре выветривания. Сведения о поведении титана в статьях этих сборников обычно ограничиваются результатами химического определения этого элемента в разных по генезису корах выветривания и их зонах [8, 47, 77, 95, 96]. Лишь в единичных работах [8] сделаны выводы о накоплении двуокиси титана совместно с алюминием и железом в верхних зонах кор выветривания. Распределение титана в корах выветривания, как правило, изучается вне связи с его распределением в коренных породах. Только в отдельных работах [47] содержатся данные о степени

выветривания в сравнении с исходным материалом. Сведения о первичных минералах титана и характере их изменения при выветривании более чем скромные. В лучшем случае констатируется присутствие в корках выветривания остаточного ильменита [8]. Если ильменит лейкоксенизируется, то характер этого изменения детально не изучается [47, 95, 96].

Генетическая связь переотложенных бокситов и глин с корками выветривания большинством исследователей не оспаривается. Поэтому в работах специалистов, изучающих бокситы и глины, известная роль отводится исследованию кор выветривания, материал которых служил первоисточником для формирования как бокситов, так и глин. В этой связи интересно кратко проанализировать

химии титана в корках выветривания по работам специалистов, изучавших бокситы и глины (материалы Всесоюзных совещаний по геологии, минералогии и генезису бокситов в 1935, 1955 и 1965 гг.; по исследованию и использованию глин — в 1957 г.). Безусловно прогрессивен предложенный Б. М. Михайловым [70] метод, позволяющий вычислять абсолютные содержания различных элементов в разных зонах выветривания с учетом изменения объемных весов исходных пород в зависимости от степени их выветривания. Он позволяет весьма объективно судить о поведении элементов в процессе образования кор выветривания. Автор, применив его к изучению продуктов выветривания Тургая, убедительно показал малую подвижность титана в этих образованиях. Следует отметить, что из всех работ, включенных в сборники по геологии, минералогии и генезису бокситов, в которых в той или иной мере рассматривается геохимия процессов выветривания, только в одной [119] распределение различных элементов, в том числе и титана, в профилях выветривания на амфиболитах и сланцах пока

тогда. Данные о поведении титана в изученных корках выветривания немногочисленны и представлены главным образом результатами химических анализов по разным зонам выветривания. В работе Б. М. Федорова [117] приводятся доказательства того, что повышенные содержания титана в коре выветривания порфиритов связаны с титаномагнетитом. В этой же работе содержатся интересные сведения о распределении титана по фракциям различной размерности, выделенным из материала кор выветривания. Различие в содержании двуокиси титана, переходящего в солянокислые и содовые вытяжки из материала кор выветривания и бокситов, позволило Б. М. Федорову сделать очень интересный вывод о различном характере минералогических форм титана в корках выветривания и бокситах.

В настоящее время наличие не только современных, но и древних латеритных кор выветривания доказано вполне определенно. Геологическое строение этих кор выветривания для разных районов Союза и условия их формирования весьма обстоятельно освещены в литературе [3, 32, 48, 51, 53, 56, 64, 67, 78, 79, 80, 93, 97, 106, 115, 124].

Разнообразная информация по геологии и условиям образования зарубежных латеритов (Индия, Бразилия, Африка) с позиции отечественных исследователей содержится в работах Г. И. Бушинского [14], И. И. Гинзбурга [27], Н. А. Лисицкой и М. В. Пастуховой [60], Б. М. Михайлова [71]. Условия образования латеритных кор выветривания выясняются на основании анализа их геологического строения и поведения наиболее распространенных в них элементов — алюминия, железа, кремния. И хотя содержание двуокиси титана в этих образованиях достигает 20%, а иногда и больше, геохимическая судьба этого элемента и

неясными. Ограниченны сведения о минералогических формах проявления столь высоких содержаний титана в латеритах и их связях с количе-

ственно-минералогическим распределением этого элемента в исходных породах.

В последнее время интерес к геохимии титана в процессе образования ртутинских пород значительно возрос. Это следует объяснить, по-видимому, выяснением той немалой роли, которую играет геохимия этого элемента и других элементов-гидролизатов в познании закономерностей осадочного процесса вообще и условий образования бокситов в частности. В этой связи следует назвать работы Г. И. Бушинского [14, 15, 16, 17], А. Б. Ронова и А. А. Мигдисова [101, 103], А. А. Мигдисова [68, 69], К. Н. Трубиной, Н. А. Лисицыной, М. В. Пастуховой [57, 61, 116]. В этих работах, помимо общей картины распределения титана в корах выветривания и подтверждения известного факта его концентрации совместно с алюминием в верхних частях профилей выветривания, изучены другие вопросы геохимии этого элемента и сделаны интересные выводы. Так, установлены случаи разделения титана и алюминия при инфильтрационном формировании хлоритов. Констатируется низкое содержание титана в сидеритизированных продуктах выветривания и его полное отсутствие в галлуазитовых, аллофановых и каолинитовых накоплениях, возникших из водных растворов при вторичных процессах. На основании этих фактов сделаны выводы о переносе алюминия и титана при их переносе в водных растворах, что является убедительным доказательством несостоятельности точки зрения, предполагающей отложение основных компонентов бокситов из этих растворов [116]. Аналогичный вывод содержится в работах Г. И. Бушинского [14], А. П. Виноградова [21] и других исследователей. Интересно указание об отсутствии связи титана с железом в корах выветривания основных эффузивных пород [61, 116] и об их совместном накоплении в зоне свободных окислов при формировании латеритов [61]. В работах А. Б. Ронова [103] и А. А. Мигдисова [69] поведение титана изучено в сравнении с геохимически родственными ему элементами (Al, Ga, Ta, Nb, Zr, Hf, Th) и в тесной связи с характером распределения этих элементов в коренных породах разного состава. Устанавливается, что распределение титана и других элементов-гидролизатов в профилях выветривания на разных по составу породах в значительной мере определяется формой нахождения названных элементов в этих породах. Авторами подробно изучены условия сонахождения титана и других элементов-гидролизатов в продуктах выветривания и причины их отдельной миграции в процессах выветривания. Изучение обширного фактического материала и обстоятельный анализ полученных результатов позволил этим исследователям сделать важный вывод о том, что в процессе выветривания первичные минеральные формы нахождения титана и других элементов-гидролизатов в коренных породах преобразуются, изменяются их соотношения и создаются новые формы, определяющие геохимию этих элементов в осадочном цикле. Этим выводом подчеркивается необходимость изучения геохимии титана и других элементов-гидролизатов в корах выветривания.

Таким образом, геохимия титана в процессе образования кор выветривания стала изучаться лишь в самое последнее время. Некоторые вопросы поведения элемента в данном процессе остаются нерешенными. Это прежде всего характер распределения титана и других элементов-гидролизатов в коренных породах [61] и вопросы баланса этих элементов при выветривании с учетом изменения физико-химического состояния исходных образований [103]. Лучшего оставляет желать состояние изучения минералогических форм титана в коренных породах и продуктах их выветривания.

## Поведение титана в продуктах переротложения коры выветривания (бокситов, глинах)

Следует признать, что к настоящему времени геохимия титана в бокситах изучена более полно и обстоятельно, чем в корах выветривания. Двуокись титана является непременной составной частью бокситов всех генетических типов, тем не менее до самого последнего времени геохимии титана в этих образованиях незаслуженно уделялось мало внимания. Еще в 1937 г. в связи с широко развернувшимися в нашей стране работами по изучению бокситов В. И. Вернадский обратил внимание исследователей на необходимость и важность познания геохимии титана для выяснения условий образования бокситов [19]. Тем не менее это указание В. И. Вернадского исследователями бокситов на многие годы было оставлено без должного внимания. В работах по геологии и генезису мезозойских бокситов, опубликованных в трудах ВИМС в 1936—1937 гг., сведения о титане весьма скудные. В статьях Е. М. Великовской [18], Е. В. Рожковой и М. В. Соболевой [99], Б. М. Федорова [117], П. Л. Безрукова и А. Л. Яшина [1] и других авторов, помимо результатов химических анализов по определению содержания двуокиси титана в разных типах мезозойских бокситов из различных районов Союза, содержатся указания о низком содержании титановых минералов (ильменита, сфена, рутила, титаномагнетита) в изученных бокситах. Это обстоятельство, а также тот факт, что двуокись титана в значительных количествах переходит в кислотные вытяжки, дали основания исследователям сделать вывод о том, что основная масса титана в бокситах находится в форме гелей сложного состава совместно с кремнеземом, гидратами алюминия и окислами железа. Кроме того, в названных работах приведены некоторые данные о распределении двуокиси титана в материале бокситов и в бобовиках из них. Сравнение с распределением титана и описание его минералогических форм в корах выветривания, генетически связанных с бокситами, не приводится. Некоторые указания на этот счет содержатся в работе Б. М. Федорова [117].

В последующих работах, содержащих условия образования бокситов, и особенно в исследованиях последнего времени вопросы геохимии титана занимают значительное место. Появился ряд специальных работ, освещающих поведение титана в процессе образов-

ований по геохимии титана при бокситообразовании имели работы Г. И. Бушинского [14, 16, 17], А. П. Виноградова [21], Н. М. Страхова [109, 110], в которых показано, что титан и алюминий как в глинах, так и в бокситах накапливаются пропорционально. Случаи значительного отклонения от с

либо химическим переносом и концентрацией алюминия, либо механическим привнесением минералов титана. Благодаря этим особенностям титан приобретает большое значение как показатель химического или механического переноса глинозема в процессе образования бокситов. Вопросы сравнительного изучения геохимии титана в корах выветривания и связанных с ними бокситах рассматриваются в ряде работ [14, 15, 57, 60, 61, 103]. Установив

и алюминием (титановый модуль), характерные для бокситов, формируются еще в коре выветривания и унаследуются при бокситонакоплении. Причины отклонения от этой закономерности различны, но прежде всего связаны с размером зерен титановых минералов и отдельной химической миграцией титана и алюминия. Современные данные по этому вопросу и значение титанового модуля для познания генезиса бокситов обсуждены в работе Н. М. Страхова [110].

Интересные и убедительные выводы относительно условий образования бокситов сделаны на основе изучения распределения титана и других элементов-гидролизатов среди структурных элементов бокситов — бобовин, цемента, а также по различным гранулометрическим фракциям рыхлых разностей бокситовых пород. Следует сказать, что данные по распределению титана, а также алюминия и железа в бобовинах и цементе бокситов содержатся почти во всех крупных работах, посвященных изучению бокситов. Эти данные различны: так, С. И. Бенеславский [2, 3] для мезо-кайнозойских бокситов Енисейского кряжа отмечает преобладание двуокиси титана в цементе над его содержанием в бобовинах (соотношение 3 : 2); обратные соотношения для многих типов разновозрастных бокситов Казахстана и З.

Н. А. Лисицыной и М. В. Пастуховой [58]. Однако генетическую интерпретацию указанные данные стали получать лишь в самое последнее время. В этой связи следует назвать исследования М. В. Пастуховой [83], А. А. Мигдисова [69]. По М. В. Пастуховой, терригенные бобовины бокситоносных пород Тургая обогащены  $TiO_2$  по сравнению с цементом. В этих бобовинах, в отличие от цемента,  $TiO_2$  отчетливо связано с  $Fe_2O_3$ , в цементе с  $Al_2O_3$ . Такие соотношения, по мнению М. В. Пастуховой, свидетельствуют в пользу терригенного генезиса бокситов. Рыхлые бокситы и бокситоносные глины обогащены  $TiO_2$  во фракции  $>0,01$  мм, в которую попадают обломки железистых бобовин; минимальные содержания  $TiO_2$  приурочены к фракциям  $<0,001$  мм. Наиболее обогащены  $TiO_2$  тяжелая и магнитная фракции бокситовых пород, что тоже указывает на определенную связь  $TiO_2$  с минералами железа. По данным А. А. Мигдисова, в бокситах большая часть титана входит в состав минералов глинозема и глинистых минералов, меньшая часть находится в виде частично раскристаллизованных дисперсных гидрооксидов и лишь небольшое его количество связано с обломочными минералами.

Обстоятельно и на большом фактическом материале рассматривается геохимия титана и других элементов-гидролизатов (Al, Ga, Nb, Ta, Th) в работах А. Б. Ронина и А. А. Мигдисова [101, 102, 103], А. А. Мигдисова [68, 69], Д. Н. Пачаджанова [76, 77]. Устанавливая геохимическое родство этих элементов и их постепенное накопление в генетическом ряду: магматогенные породы — коры выветривания — бокситы — глины. Указанные исследователи определяют также причины, обуславливающие нарушения постоянства соотношений названных элементов-гидролизатов в глинах и бокситах. По их мнению, такими причинами могут быть: 1) действие сульфатных растворов; 2) диагенетическое перераспределение вещества, вызывающее отделение алюминия от остальных элементов-гидролизатов; 3) влияние органики, нарушающее корреляцию Ti и Ga с Al и Ti с Nb и 4) механическая примесь терригенных минералов, разделяющая Ti и Al, Ti и Nb, Nb и Ta. По признанию Д. Н. Пачаджанова [77], недостатком изучения геохимии элементов-гидролизатов в бокситах является слабая изученность связи этих элементов в коренных породах, по которым развивались бокситы.

Минералогия титана в бокситах в общем изучена слабо. Высказывания Г. И. Бушинского [14] и М. Н. Яковлевой [124] о том, что неясно, в какой минералогической форме находится основная масса титана в бокситах, остаются справедливыми до сих пор. В обширной литературе по бокситам титановые минералы в лучшем случае только называются или кратко описываются. По причине их тонкодисперсности количественное содержание этих минералов в бокситах обычно не указывается, за исключением тех редких случаев, когда их количество определяется расчетом по данным химических анализов [58]. Специально вопросы минералогии титана в бокситах рассматриваются в работах С. И. Бене-

славского [2, 3], Е. М. Брадинской [12, 13]. Описываются ильменит, лейкоксен, рутил, анатаз, брукит, сфен, перовскит, титаномагнетит. Наиболее распространены ильменит, лейкоксен, рутил и реже титаномагнетит (в девонских бокситах Урала [14]). Остро дискутируется вопрос о наличии гидратных форм двуокиси титана в бокситах. Присутствие таких форм доказывается Е. В. Рожковой и М. В. Соболевой [99] по наличию рутила в гиббситовой массе боксита только после прокаливания при 900°С, а также С. И. Бенеславским [2, 3] на основании обнаружения титана в кислотных и щелочных вытяжках из бокситового материала. Е. М. Брадинская [12], разделявшая вначале эту точку зрения, впоследствии несколько изменила ее [13]. Она указывает, что рутил в гиббситовой массе боксита рентгенометрически обнаруживается и без прокаливания. Кроме того, по ее данным, титан в щелочные вытяжки не переходит, а в сернокислотные он извлекается почти полностью даже тогда, когда минералогически представлен в форме тонкодисперсного рутила. Таким образом, по мнению Е. М. Брадинской, наличие титана в кислотных вытяжках из бокситового материала не является убедительным доказательством присутствия гидратированных форм этого элемента в бокситах. Допуская тем не менее возможность существования в бокситах гидратированной формы двуокиси титана, Е. М. Брадинская полагает, что эта форма не сингенетична основному бокситовому материалу, а вторична и образовалась при изменении ильменита. Характер изменения (лейкоксенизации) этого минерала подробно описан Е. М. Брадинской. Следует указать также, что лейкоксенизация ильменита в гипергенных условиях весьма обстоятельно изучалась рядом исследователей [12, 13, 36, 39, 52, 76, 120, 126, 127, 128—139].

Генезис титановых минералов различными исследователями трактуется по-разному. Так, С. И. Бенеславский [3] считает, что титан поступал в бокситовые бассейны в коллоидных растворах и не привнесен с терригенным материалом. Из первичного гелевого вещества двуокиси титана раскристаллизовались все титановые минералы боксита, а Г. И. Бушинский [14], А. К. Гладковский, И. Н. Ушатинский [29] и также Д. А. Гартман [133] полагают, что титановые минералы в бокситах имеют терригенное происхождение и с ними связана основная масса содержащегося в них титана. Между тем изучение минералогических форм титана и их происхождения имеют существенное значение для выяснения условий обр.

Данные о поведении титана при вторичных процессах, преобразующих состав начального бокситового материала, немногочисленны. Сущность вторичных преобразований бокситового материала, а также поведение титана и других элементов-гидролизатов при этих преобразованиях обсуждены в исследованиях ряда авторов [5, 14, 16, 17, 28, 55, 59, 103]. Устанавливается, что при вторичных преобразованиях бокситового м

лотных растворов или органики происходит перераспределение элементов-гидролизатов. Случаи образования беститановых скоплений гиббсита, а также аллофановых и галлуазитовых глин описаны в работах упомянутых исследователей, а также в некоторых других. При каолиннизации, кальцитизации, пиритизации и сидеритизации боксита также происходит миграция и разделение титана, алюминия и железа, но титановый модуль при этом существенно не изменяется. Таким образом, при вторичных преобразованиях бокситового материала, протекающих главным образом под влиянием водных растворов, в силу некоторого различия химических свойств титана и других элементов-гидролизатов происходит их перераспределение, а также частичное или полное разделение. А. Б. Ронов и А. А. Мигдисов [103] считают, что миграция элементов-гидролизатов под влиянием вторичных процессов не оказывает

существенного влияния на характер первичного распределения этих элементов в бокситах.

Таким образом, геохимия титана в бокситах и глинах, особенно в работах последнего времени, изучена весьма обстоятельно. Значительная роль, которую играет геохимия этого элемента и других элементов-гидролизатов в познании закономерностей осадконакопления вообще и условий образования бокситов, в частности, привлекает к этим работам пристальное внимание все большего числа исследователей. Однако некоторые вопросы в этих исследованиях остаются слабоизученными. К ним относятся прежде всего характер распределения элементов-гидролизатов в исходных породах, баланс этих элементов и их минералогические формы в продуктах выветривания и переотложения, в частности, в бокситах.

### **Поведение титана в условиях выветривания по экспериментальным данным**

Экспериментальные исследования гипергенных процессов привлекают к себе все большее внимание исследователей, особенно в последнее время. Ниже кратко остановимся на результатах тех работ, в которых по экспериментальным данным рассматривается поведение титана в условиях выветривания.

Интересны опыты по растворимости совместно находящихся свежеосажденных гидратов Si, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Ti, Al в присутствии гуминовых и фульвокислот, а также восстановителя SO<sub>2</sub> при разных рН промывной жидкости, произведенные А. П. Виноградовым [21]. Эти опыты показали, что как абсолютное извлечение титана, так и извлечение его по отношению к алюминию при рН от 2,9 до 10,4 ничтожно мало и практически остается постоянным. В присутствии восстановителя извлечение титана не изменяется. Гуминовые и фульвокислоты селективно также не извлекают титан, и изменения отношения Al : Ti не происходит. Таким образом, экспериментально показано, что подвижность титана в растворах и при воздействии органических кислот почв очень мала. Поэтому А. П. Виноградов сделал вывод, что причиной высокой концентрации титана в бокситах является не совместимое его химическое осаждение с алюминием, а десиликация породы и удаление железа обычными водными растворами при рН около 7. Образовавшаяся таким образом на месте бокситовая порода затем может быть переотложена.

Интересны также результаты экспериментальных исследований М. Н. Яковлевой [123, 125] по изучению поведения Al, Si, Ti и Fe в условиях сернокислотного выветривания коренных пород при окислении колчеданного месторождения и в условиях сернокисотно-болотного выветривания. Установлено, что в случаях низкой концентрации серной кислоты, но в присутствии органики (торфа) в раствор переходят изучаемые элементы, но при этом наблюдается некоторое отставание алюминия, который частично удерживается торфом. В случае высокой концентрации серной кислоты в присутствии торфа кремний, задерживаясь в твердой фазе продуктов выветривания, отстает в миграции от алюминия и титана. В условиях сернокислотного выветривания без участия органики кремний и титан, задерживаясь в твердой фазе коры выветривания, отстают в миграции от алюминия. Касаясь приложения полученных экспериментальных данных к вопросу происхождения бокситов, М. Н. Яковлева считает, что продукты сернокислотного выветривания могут дать только беститановые концентрации алюминия.

Данные экспериментов по электродиализу главнейших породообразующих, а также акцессорных и рудных минералов содержатся в рабо-

гах А. Б. Ронина и А. А. Мигдисова [103]. Авторами установлено, что наибольшую устойчивость к выветриванию обнаруживают акцессорные и рудные минералы. При электролизе порошка ильменита в течение трех суток титан в раствор практически не переходит. Следы этого элемента обн  
средах.

Процесс осаждения гидроокиси титана был исследован П. Н. Коноваленко и В. Н. Нестерович [49] методом полярографии. Они нашли, что  $Ti(OH)_4$  образуется в интервале значений рН от 2 до 5. При этом растворимость  $Ti(OH)_4$  оказалась равной  $3,4 \cdot 10^{-9}$  мол/л, а произведение растворимости —  $1,61 \cdot 10^{-38}$ . Исследования З. Я. Берестневой и других [6] показали, что полученная в результате гидролиза гидроокись титана содержит в небольших количествах и титан, находящийся в истинном растворе, а также промежуточные продукты гидролиза. По экспериментальным данным, уже через два часа после своего выпадения гель гидроокиси титана раскristаллизовывается в рутил, брукит или анатаз. При повышении температуры этот процесс ускоряется. А. В. Памфилова и Е. Г. Иваничева [82] нашли, что наличие в растворе иона  $SO_4^{2-}$  или  $PO_4^{3-}$  приводит к кристаллизации анатаза, а из солянокислых растворов кристаллизует рутил. Наличие в солянокислом растворе даже 5%  $Na_2SO_4$  приводит к образованию анатаза. Точно такие же выводы относительно условий выделения анатаза и рутила из кислых растворов содержатся в исследованиях Шоссбергера [138], показавшего, что примеси играют определяющую роль в образовании той или иной полиморфной разновидности  $TiO_2$  при низких температурах.

Поведение титана, алюминия, железа и некоторых других элементов при выветривании силикатных минералов с использованием результатов экспериментальных исследований рассматривается в работе Ф. К. Лоуг-

ции этих элементов. Показано, что в пределах природных значений рН от 4 до 10 как  $Al^{3+}$ , так и  $Ti^{4+}$  независимы от всех перечисленных факторов и не могут быть подвижными. Подвижность железа в значительной степени обусловлена Eh среды.

### **Поведение титана в коре выветривания и продуктах ее переотложения в исследованном районе**

Данные по титаноносности коры выветривания и продуктов ее переотложения (бокситов, глин) Барзасского района немногочисленны. Специальных исследований по геохимии титана и других элементов-гидролизатов в этом районе до настоящего времени не проводилось.

Д. И. Емельянова, Н. Г. Береснев, Л. Г. Кочуров и др. собрали данные по геологии района, распространению и геологическому строению коры выветривания, бокситов и огнеупорных глин, минералогическому и химическому составу, а также условиям их образования. И хотя некоторые материалы специально посвящены характеристике титаноносности коры выветривания на упомянутых четырех участках, сведения о поведении титана в процессе образования коры выветривания и продуктов ее переотложения ограничены. Особенно слабо охарактеризовано распределение титана в коренных породах (амфиболитах, габбро, сланцах), что признается самими исследователями. Данные о распределении титана в коренных породах обычно ограничиваются несколькими результатами химических анализов и указанием на присутствие в них ильменита или сфена, количество которых подсчитано по малому числу шлифов. В коре выветривания, бокситах и глинах распределение титана характеризуется значительным числом химических анализов (более тысячи).

Устанавливается, что повышенные содержания титана приурочены главным образом к верхним переотложенным горизонтам коры выветривания. Более детального геохимического толкования распределения титана в профиле выветривания не содержится. Из минералов титана выделяются ильменит, рутил, титаномагнетит, сфен. Л. Г. Кочуров, Н. Г. Береснев, Д. И. Емельянова и др. эти минералы описывают очень кратко, а характер и степень их изменения при выветривании почти не обсуждается. При минералогическом описании бокситов и огнеупорных глин титановые минералы обычно только называются. Некоторые данные по распределению двуокиси титана в различных фракциях материала коры выветривания содержатся в технологических материалах по обогащению титаноносных глин выветривания. Но они совсем не увязаны с минералогической формой нахождения титана в этих фракциях. Кроме того, распределение титана как в коре выветривания, так в бокситах и глинах изучено без с гидролизатом, как алюминий, а также железом.

Геологическую и химическую характеристику коры выветривания и пестроцветных глин в данном районе можно найти у В. П. Казаринова [46]. Геологическое строение, условия залегания и формирование бокситовых осадков освещены в работах С. Л. Спирина и Ф. Г. Пасовой [108], А. Н. Сухариной и Д. И. Емельяновой [111]. Структурные типы бокситов Барзасского района и детальная литолого-геохимическая характеристика изучены А. Н. Лисицыной и М. В. Пастуховой [58]. Краткая геолого-минералогическая характеристика Барзасской элювиальной россыпи ильменита дана в работе А. Н. Сухариной [112]. Геологическое строение месторождений огнеупорных глин Барзасского района изучены А. Н. Сухариной и А. А. Петропольской [113], а их физико-химическая характеристика имеется в работах Ф. А. Матвеевой [65], Ф. А. Матвеевой и Т. Ф. Мелеховой [66], Е. Н. Поморцевой [91]. Во всех перечисленных работах содержатся некоторые данные о распределении титана в корях выветривания, бокситах и глинах Барзасского района. Эти данные ограничиваются главным образом результатами химических анализов и кратким описанием титановых минералов. При этом геохимические исследования поведения титана и условий формирования высоких концентраций этого элемента в коре выветривания отсутствуют.

Занимаясь в течение нескольких лет (1958—1965 гг.) исследованием источников питания и условий образования титано-циркониевых россыпей на юго-востоке Западной Сибири, автор изучал титаноносные коры выветривания и продукты их переотложения (бокситы, глины) в Барзасском районе. Результаты этих исследований изложены в ряде работ [74, 75, 76, 120]. Констатировано неравномерное распределение титана и его минералов в коренных породах (амфиболитах). При изучении ильменита в отраженном свете устанавливается, что он совершенно чист и не содержит никаких включений. Однако подробное распределение титана и его связь с алюминием и другими элементами-гидролизатами, а также железом в коренных породах не изучались. Остался неясным баланс распределения общего количества титана между собственно титановыми минералами и содержанием этого элемента в темноцветных порообразующих минералах коренных пород. В коре выветривания неравномерное распределение титана наследуется от коренных амфиболов, и максимальные концентрации этого элемента устанавливаются в верхних переотложенных горизонтах профиля выветривания. Подробно описываются наиболее распространенные титановые минералы — ильменит, титаномагнетит, лейкоксен, рутил — и их изменение при выветривании. Показано, что вверх по разрезу коры выветривания степень лейкоксенизации ильменита возрастает. Наиболее лейкоксенизирован ильменит в бокситах. Тем не менее распределение титана и характер его связи с алю-

минием как в коре выветривания, так в бокситах и глинах остались не изученными. Значение титанового модуля для познания генезиса бокситов района не обсуждено.

После 1965 г. автор приступил к специальным исследованиям по геохимии титана в коре выветривания и продуктах ее переотложения (бокситов, глинах) в Барзасском районе.

### Формулировка задач исследований

Учитывая вышеизложенный материал о состоянии изученности геохимии титана и других элементов-гидролизатов в корах выветривания, бокситах и глинах, автор формулирует задачи исследования в предлагаемой работе следующим образом.

1. Выяснение особенностей распределения титана и геохимически родственных ему элементов-гидролизатов — Al, Nb, Ta, Th — а также железа в исходных материнских породах исследуемого района, коре выветривания на них и в продуктах ее переотложения (бокситах, глинах). Изучение влияния форм нахождения титана и других элементов-гидролизатов в исходных породах на характер их распределения в коре выветривания и продуктах ее переотложения.

2. Выяснение роли геохимии титана для познания условий формирования бокситов.

3. Изучение условий образования высоких концентраций титана в коре выветривания и возможности их промышленного использования.

## Глава II

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В полевых условиях кора выветривания, а также связанные с нею бокситы и глины в данном районе изучались по керну скважин, вскрывающих, кроме того, и коренные породы. Из коренных пород и их выветрелых продуктов производился отбор материала для дальнейших лабораторных исследований. Разновидности коренных пород были опробованы для петрографического, минералогического и геохимического изучения. С целью количественного учета и качественной характеристики титановых минералов отобрано также 40 проб-протолок из наиболее распространенных коренных пород; вес каждой из них составил 5—10 кг. В тех же целях из рыхлого материала коры выветривания, бокситов и глин было взято около 400 проб, отобранных по методике, предложенной А. Б. Роновым и В. М. Ратынским [100].

В лабораторных условиях собранный каменный материал исследовался различными методами. Количественно-минералогический состав коренных пород устанавливался по шлифам с помощью интеграционного столика. Рудные непрозрачные (в том числе титановые) минералы диагностировались в отраженном свете. По каждой разновидности пород подсчитывалось не менее 5—7 шлифов размером 3,0×7,0 см. Содержания титановых минералов, установленные при подсчете по шлифам, контролировались данными, полученными при учете этих минералов в магнитных, электромагнитных и тяжелых фракциях, выделенных из проб-протолок.

Из рыхлого материала коры выветривания, бокситов и глин выделялись следующие фракции (в мм):  $>2,0$ ;  $2,0-1,0$ ;  $1,0-0,5$ ;  $0,50-0,25$ ;  $0,25-0,10$ ;  $0,10-0,05$ ;  $0,05-0,01$ ;  $0,01-0,001$  и  $<0,001$ . Песчаные ( $>0,05$  мм) фракции выделялись на ситах; алевритовые ( $0,05-0,001$  мм) и глинистые ( $<0,001$  мм) — методом отмучивания в батарейных стаканах. Общий ход гранулометрического анализа выветрелого глинистого материала определялся методическими указаниями В. А. Новикова [81] и Л. Б. Рухина [104]. Из материала коры выветривания, бокситов и глин было выделено около 800 различных фракций.

Вещественный состав песчаных ( $>0,05$  мм) фракций изучался под биноклем и в иммерсионных препаратах. Рудные непрозрачные (в том числе титановые) минералы диагностировались и исследовались в цементированных полировках в отраженном свете. Материал алевритовых ( $0,05-0,001$  мм) и глинистых ( $<0,001$  мм) фракций изучался методами рентгенографии, термометрии и инфракрасной спектроскопии (ИКС). Рентгенометрические определения (20 определений) и ИКС (15 определений) выполнены в Институте геологии и геофизики СО АН СССР младшими научными сотрудниками Н. И. Зюзиным и Г. А. Голубовой. Термический анализ глинистых минералов (50 определений) произведен на пирометре Курнакова в лаборатории Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС) Г. А. Белобородовой.

Во всех исследуемых объектах изучаемые элементы (Ti, Al, Nb, Ta, Th, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>) устанавливались только химическими анализами. Они выполнялись в Институте геологии и геофизики СО АН СССР кандидатом химических наук В. М. Дорош, младшим научным сотрудником А. В. Сухаренко и старшим лаборантом А. А. Дурасовым. TiO<sub>2</sub>, FeO, а также кремнекислота определялись по обычной методике силикатного анализа [92]; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>ок</sup> — трилометрическим методом [94, 118]; Th — фотокалориметрированием с арсеназом III [90]; Nb и Ta — по методике, предложенной кандидатом химических наук В. М. Дорош [34, 35]. Из материала коренных пород, коры выветривания, бокситов, глин и их отдельных фракций выполнено анализов: по определению TiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>ок</sup>; FeO — около 500; Nb и Ta—56; Th—105; свободный глинозем определялся в 18 пробах. Кроме того, были использованы многочисленные (около 2000) химические анализы на TiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержащиеся в фондах Западно-Сибирского геологического управления. Помимо внутреннего, был осуществлен также внешний контроль по определению ошибки воспроизводимости выполненных анализов, который проводился примерно с 30% проб от их общего количества на каждый элемент. Внешний контроль был проведен в Центральных химических лабораториях Березовской экспедиции и Новосибирского геологического управления, являющихся арбитражными в Министерстве геологии РСФСР. Контрольными анализами установлена незначительная ошибка воспроизводимости при определении изучаемых элементов. Так, ошибка воспроизводимости при определении TiO<sub>2</sub> в интервале значений от 0,0 до 19,0% составила  $\pm 0,31 \pm 0,33\%$ , а в более узком интервале значений от 0,0 до  $5,0 \pm 0,09\%$ .

Объемные веса коренных пород и продуктов их выветривания определялись в лаборатории физических свойств горных пород по общепринятой методике [40] лаборантом В. А. Масловым. Рыхлые образцы предварительно парафинировались. Выполнено 40 определений объемного веса. Объемные веса бокситов и глин заимствованы у Д. И. Емельяновой.

Геохимическая интерпретация аналитических данных велась с использованием методов математической статистики. Для оценки степени изменения содержаний исследуемых элементов в изученных объектах и

сравнения их между собой использовался коэффициент вариации  $W$ , который связан со средним квадратичным отклонением  $\sigma$  следующим выражением  $W = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%$  [122], где  $\bar{x}$  — среднее арифметическое значение содержания элемента. Вычисление средних арифметических значений и средних квадратичных отклонений производилось по общепринятым методам математической статистики [87, 122]. Мера связи между исследуемыми элементами определялась величиной коэффициентов корреляции, которые также высчитывались по общепринятой методике [87, 122]. При этом в случае достаточно большого числа анализов  $n$  ( $n \geq 15$ ) среднюю ошибку  $\sigma_r$  коэффициента корреляции  $r$  приближенно можно оценить по формуле [122]:  $\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}$ . Значения вычисленных ошибок с соответствующими значениями коэффициентов корреляции показаны в таблицах 8, 13, 18—21, 26.

Опыты по обогащению титаноносных кор выветривания описаны и результаты их обсуждены в специальной работе [30], поэтому методика проведения этих опытов здесь не рассматривается.

### Глава III

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ГЕОЛОГИИ РАЙОНА

Район исследований расположен в северо-западных предгорьях Кузнецкого Алатау, на площади Золотокитатского выступа, заключенного между Кузнецкой котловиной на юго-западе и Чулымо-Енисейской впадиной на северо-востоке. Обзорная геологическая карта района приведена на рис. 1, а схема тектонического строения на рис. 2.

Геологическое строение района изучали Г. Ф. Горелов, Л. В. Алабин, М. А. Пантюхина, Л. М. Мысина, Д. И. Емельянова, Н. Г. Береснев, М. А. Луппов, А. А. Дмитриева, Л. Г. Кочуров. Установлено, что Золотокитатский выступ сложен главным образом протерозойскими и кембрийскими сильно дислоцированными породами осадочного и магматического происхождения, на поверхности которых сохранилась кора выветривания, а также осадочные образования мезозойского и кайнозойского возраста. Таким образом, в геологическом строении района можно выделить два структурных этажа: верхний, сложенный рыхлыми континентальными осадками мезо-кайнозоя, и нижний, представленный дислоцированными породами палеозоя и протерозоя, служащими фундаментом для первых.

1. Породы фундамента имеют общее север-северо-западное простирание в пределах  $325\text{—}350^\circ$  и крутое под углами  $60\text{—}80^\circ$  падение на юго-запад. Поверхность фундамента плавно погружается на север. Значительная часть фундамента сложена метаморфическими протерозойскими образованиями терсинской свиты. В пределах изученных участков эти образования слагают 90% площади фундамента. По петрографическому составу и условиям залегания выделяется нижняя и верхняя подсвиты. Нижняя подсвита ( $Pt^{tr_1}$ ) слагает восточную часть выхода пород терсинской свиты и представлена амфиболитами, чередующимися с мраморизованными известняками. Амфиболиты являются существенной составной частью пород нижней подсвиты и образуют в известняках серию многочисленных параллельных послойных тел, линз и прослоев длиной от 200 м до 2—4 км и мощностью от нескольких до 300 м. Условия

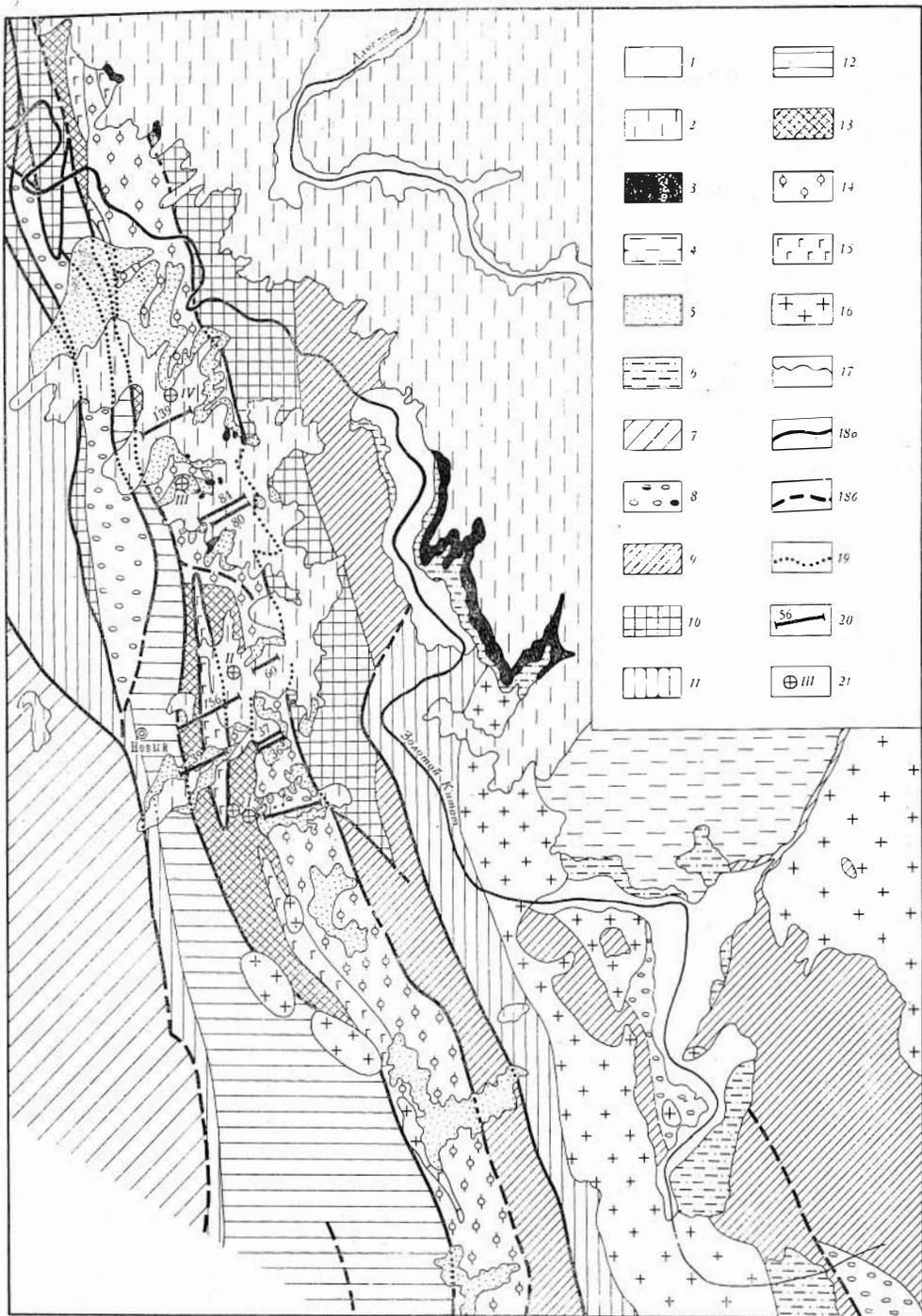


Рис. 1. Обзорная геологическая карта района исследований. Составлена по материалам Западно-Сибирского геологического управления, по Л. Г. Кочурову (1963 г.)

1 — четвертичные (Q), террасовые глинисто-песчано-галечные отложения;  
 2 — симоновская свита (Cr<sub>2</sub><sup>СП</sup>), песчано-галечные отложения с редкими прослоями и линзами глин;

3 — ильинская свита (Cr<sub>1</sub><sup>И</sup>), пестроцветные и огнеупорные глины, бокситы;  
 4 — илекская свита (Cr<sub>1</sub><sup>И</sup>), пески, песчанки, аргиллиты;

залегания амфиболитов и известняков нижней подсвиты терсинской свиты иллюстрируются геологической картой Глухаринского участка (рис. 3), а также геологическими разрезами (рис. 4—8). Контакты амфиболитов с известняками обычно резкие.

Породы верхней подсвиты терсинской свиты ( $Pt^{tr_2}$ ) менее распространены, чем амфиболиты и известняки нижней подсвиты. На участках Еденисском и Суховском отложения верхней подсвиты достигают максимальной мощности 2500 м, но на широте пос. Глухаринка резко обрываются и появляются вновь после пересечения полосы протяжения терсинской свиты р. Золотой Китат, где мощность пород верхней подсвиты уменьшается до 600 м. Характерной особенностью комплекса пород верхней подсвиты является отсутствие среди них известняков. Подсвита сложена амфиболитами, амфиболовыми, хлоритовыми и хлорит-серицитовыми сланцами, которые залегают непосредственно на мраморизованных известняках нижней подсвиты, иногда разделяются зоной гранатовых скарнов. С корой выветривания и продуктами ее переотложения, развитыми на породах терсинской свиты, связан весь комплекс полезных ископаемых района (титаноносная кора выветривания, бокситы, огнеупорные глины). Петрографическая характеристика пород терсинской свиты приведена в главе V. Протерозойский возраст пород терсинской свиты определен условно, главным образом на основании их более высокой степени метаморфизма в сравнении с изменением пород синийско-кембрийского комплекса (Г. Ф. Горелов, Л. В. Алабин, М. А. Пантюхина, Л. М. Мысина).

Синийские образования района объединены в енисейскую свиту, состоящую из двух подсвит и залегающую в форме двух разрозненных полос северо-западного простираения. Породы нижней подсвиты ( $Sn^{en_1}$ ) слагают полосу к западу от площади распространения образований терсинской свиты (рис. 1). Они представлены в основном кварцитами с небольшими телами порфиритов, прослоями известняков и глинистых сланцев в них. Мощность осадков нижней подсвиты 840 м. Породы верхней подсвиты енисейской свиты ( $Sn^{en_2}$ ) распространены главным образом в восточной части района. Здесь они представлены в основном кристаллическими известняками, доломитизированными известняками и доломитами. В северо-западной части района в составе верхней подсвиты увеличивается роль сланцев, эффузивов и доломитов. Мощность осадков верхней подсвиты 1500 м. Синийский возраст отложений енисейской свиты района принят условно по аналогии литологического состава и органических остатков с баратальской свитой Горного Алтая.

- 
- |   |  |
|---|--|
| <p>5 — кора выветривания (<math>Cr_1</math>);</p> <p>6 — итатская свита (<math>I_1^t</math>), угленосные песчано-глинистые отложения;</p> <p>7 — девонские и карбоновые отложения (Д+С) Кузнецкой котловины;</p> <p>8 — нерасчлененные осадки кембро-ордовика (<math>См_3 + O_1^t</math>), песчаники, конгломераты, сланцы;</p> <p>9 — отложения среднего кембрия (<math>См_2</math>), конгломераты, песчаники, известняки, туфобрекчии;</p> <p>10 — эффузивно-осадочные образования нижнего кембрия (<math>См_1</math>);</p> <p>11 — верхняя подсвита енисейской свиты (<math>Sn^{en_2}</math>), известняки, доломиты, сланцы, эффузивы;</p> <p>12 — нижняя подсвита енисейской свиты (<math>Sn^{en_1}</math>), кварциты с небольшими телами порфиритов, известняков, сланцев;</p> | <p>13 — верхняя подсвита терсинской свиты (<math>Pt^{tr_2}</math>), амфиболиты, амфиболовые и хлоритовые сланцы;</p> <p>14 — нижняя подсвита терсинской свиты (<math>Pt^{tr_1}</math>), амфиболиты и известняки;</p> <p>15 — кембрийский интрузивный комплекс: габбро, диориты, дуниты;</p> <p>16 — додевонский интрузивный комплекс: граниты, гранодиориты;</p> <p>17 — геологические границы;</p> <p>18 — тектонические контакты: а) достоверные; б) предполагаемые;</p> <p>19 — геологические границы и тектонические контакты под рыхлыми отложениями;</p> <p>20 — линии разрезов и их номера;</p> <p>21 — участки титаноносной коры выветривания: I — Еденисский, II — Суховской, III — Глухаринский, IV — Гавриловский</p> |
|---|--|

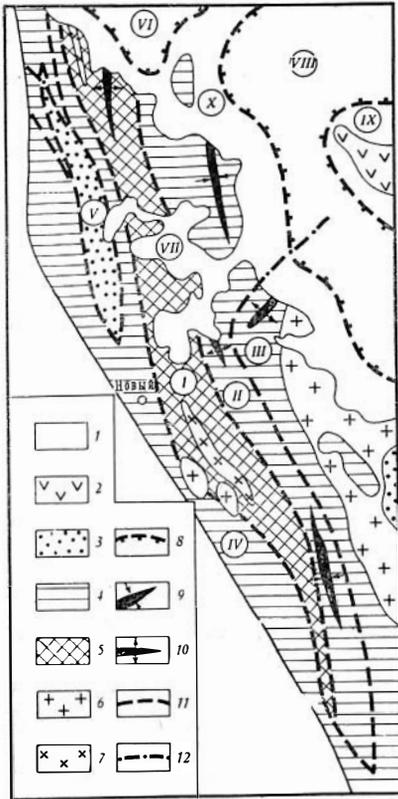


Рис. 2. Схема тектонического строения района исследований. Составлена по материалам Горелова Г. Ф. и Мысичной Л. М. (1960)

Структурные этажи:

- 1 — мезозойский;
- 2 — средне-верхнепалеозойский;
- 3 — кембро-ордовикский;
- 4 — кембро-синийский;
- 5 — протерозойский;
- 6 — додевонские гранитонды;
- 7 — среднекембрийские габбро, пироксениты;
- 8 — структурные линии в мезозойском структурном этаже;
- 9 — оси синклинальных складок;
- 10 — оси антиклинальных складок;
- 11 — разломы в палеозойских отложениях;
- 12 — разломы под мезозойским чехлом.

Тектонические структуры:

- I — Суховский горст,
- II — Мурюкский грабен,
- III — Кайгадатский выступ,
- IV — Яйский выступ,
- V — Кельбеский грабен,
- VI — Михайловская мульда;
- VII — Глухаринская структура,
- VIII — Амपालьская мульда,
- IX — Алчедатский выступ,
- X — Минский выступ

Фаунистически охарактеризованные отложения кембрия слагают значительные площади домезозойского фундамента района (рис. 1). Нижнекембрийские породы распространены сравнительно нешироко в северо-восточной части района. Они представлены эффузивными и осадочными образованиями с преобладающей ролью порфиритов основного состава и их туфов. Отложения среднего кембрия слагают значительные площади, которые удалены от изученных участков. Среднекембрийские породы представлены конгломератами, песчаниками и известняками, вверху разреза появляются туфогенные песчаники и лавовые брекчии. Нерасчлененные отложения кембро-ордовика ( $St_3-O_1^t$ ) слагают Кельбеский грабен на северо-западе района. Они представлены песчаниками и конгломератами, глинистыми и известково-глинистыми сланцами с маломощными прослоями мергелей. Общая мощность кембро-ордовикского комплекса пород около 3500 м.

Отложения девона и карбона, показанные на обзорной геологической карте (рис. 1), слагают самостоятельную геологоструктурную единицу — Кузнецкую котловину, расположенную за пределами исследованного района.

Среди интрузивных образований района выделяются кембрийский и додевонский комплексы (Г. Ф. Горелов, Л. М. Мысина). Кембрийский интрузивный комплекс сложен габбро, габбро-диоритами, диоритами, пироксенитами, дунитами, серпентинитами. Эти породы образуют многочисленные дайкообразные тела, распространенные в основном в породах терсинской свиты (рис. 1). Наиболее крупное тело амфиболового габбро расположено в пределах протерозойской толщи на контакте верхней и нижней подсвит, протягиваясь до 30 км по простиранию и изменяясь по

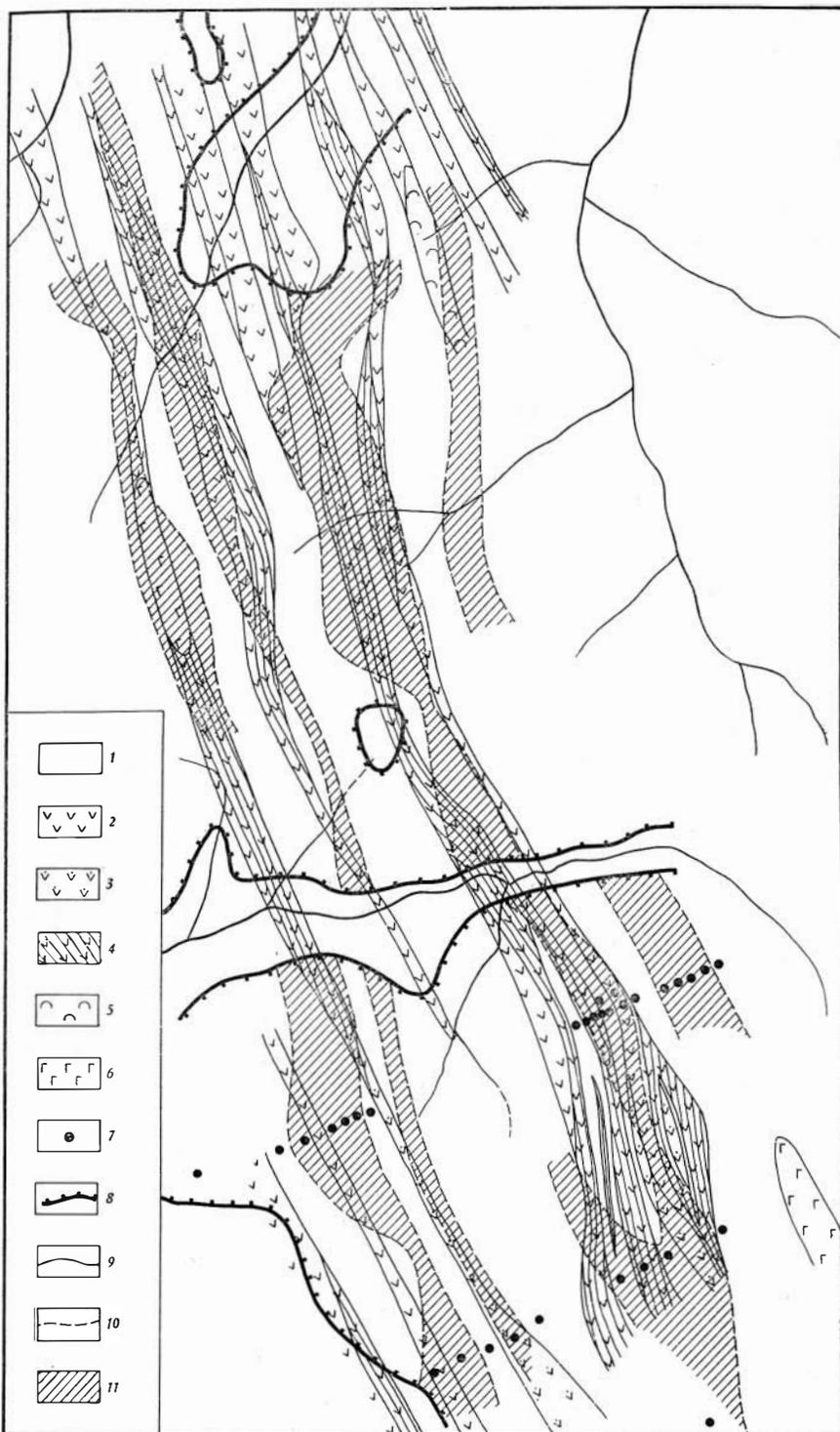


Рис. 3. Геологическая карта Глухаринского участка (по Бересневу, 1961)

Терсинская свита: 1 — известняки; 2 — амфиболиты массивные без сульфидов; 3 — амфиболиты массивные с сульфидами; 4 — амфиболиты рассланцованные без сульфидов; 5 — скарные; 6 — кембрийские габбро; 7 — скважины колонкового бурения в профилях; 8 — гра-

ница развития коры выветривания; 9 — геологические границы; 10 — контуры обогащенной титаноносной коры выветривания; 11 — площадь распространения титаноносной коры выветривания

ширине от 100 до 1000 м. В пределах участков распространены мелкие интрузивные тела габбро, пироксенитов и серпентинитов. Они подсечены единичными выработками, поэтому размеры тел и условия их залегания остались неясными. Додевонский интрузивный комплекс представлен пестрой гаммой пород кислого и основного состава, слагающих крупные массивы на востоке и юго-востоке района, а также ряд более мелких тел, значительно удаленных от изученных участков (рис. 1).

Сводный разрез рыхлых континентальных мезо-кайнозойских отложений района представляется в следующем виде (снизу вверх):

		Мощность, м
Средняя юра	Итатская свита ( $I_2^{it}$ )	0 — 100 и более
Нижний мел:		
Неоком	Илекская свита ( $Cr_1^{il}$ )	0—250
Апт-альб	Кора выветривания ( $Cr_1^{ks}$ )	0 — 80
Апт-альб	Кийская свита ( $Cr_1^{ks}$ )	0—50 и более
Верхний мел	Симоновская свита ( $Cr_2^{sm}$ )	20—100
Четвертичные отложения		10—20

Распространение выделенных отложений показано на рис. 1. Мощность, полнота разреза, а также распространение мезо-кайнозойских осадков в районе контролируется строением поверхности фундамента и условиями современной геоморфологии. В Чулымо-Енисейской впадине, где фундамент значительно опущен, разрез этих отложений полный, причем мощности отдельных его горизонтов увеличиваются к центру впадины. На Золотокитатском выступе, в районе изученных участков, где фундамент приподнят относительно впадины, нижние части разреза (итатская и илекская свиты) отсутствуют, а осадки кийской и симоновской свит, подвергаясь современному размыву, сохранились главным образом на водораздельных пространствах и в депрессиях фундамента. Геологическое строение, распространение и условия залегания нижне-меловой коры выветривания и продуктов ее переотложения (бокситов, огнеупорных глин), слагающих кийскую свиту в районе исследований, изложены в следующей главе. Отложения симоновской свиты распространены сравнительно широко (рис. 1). Они с размывом залегают на осадках кийской свиты, коре выветривания и домезозойских породах фундамента; представлены в основном грубообломочными породами песчано-гравийно-галечного состава с редкими маломощными линзами и прослоями глин. Четвертичные образования распространены повсеместно. По условиям залегания они подразделяются на отложения водоразделов и отложения речных долин. Отложения водоразделов представлены элювиально-делювиальными глинами, а также дресвой и щебнем пород фундамента, которые перекрываются покровным чехлом суглинков и глин. Отложения речных долин развиты в долине рек Золотой Китат, Алчедат (рис. 1) и др. Они представлены разнообразными террасовыми глинисто-песчано-галечными образованиями. Четвертичные отложения водоразделов с обзорной геологической карты района сняты.

Таким образом, самыми распространенными породами домезозойского фундамента на изученных участках являются протерозойские амфиболиты и мраморизованные известняки терсинской свиты. Они слагают около 90% всей исследованной территории. Синийскими сланцами, ниж-

некембрийскими эффузивами и кембрийскими габбро сложены небольшие площади. На породах фундамента сохранилась нижнемеловая кора выветривания и весь комплекс продуктов ее переотложения (огнеупорные глины, бокситы), перекрытых осадками верхнего мела и покровными четвертичными образованиями.

## Глава IV

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ, СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ ЗАЛЕГАНИЯ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ И ПРОДУКТОВ ЕЕ ПЕРЕОТЛОЖЕНИЯ

#### Распространение, строение и условия залегания коры выветривания

Кора выветривания развита на разных по возрасту и составу породах фундамента, но наиболее распространена на амфиболитах и известняках нижней подсвиты терсинской свиты (рис. 1). На сохранность коры в значительной мере повлияли размывы верхнемелового и четвертичного времени. В настоящее время кора выветривания сохранилась на водоразделах и в понижениях домезозойского фундамента. На юге района, где эрозионный срез большой, кора выветривания встречается лишь небольшими редкими разрозненными полями, лежащими ниже уровня абсолютной отметки 380 м. В пределах изученных участков продукты выветривания залегают плащеобразно. На Еденисском участке кора выветривания лежит в пределах абсолютных высотных отметок 320—340 м, площадь ее распространения здесь 3×3 км. Кора выветривания на этом участке перекрыта отложениями кийской и симоновской свит мощностью от 3 до 30 м и только в краевых частях контура распространения выходит непосредственно под четвертичные отложения. На Суховском участке кора выветривания занимает уровни абсолютных отметок 300—320 м; площадь распространения 4×7 км, также перекрыта 30-метровой толщей меловых осадков. На Глухаринском и Гавриловском участках общая площадь распространения коры выветривания 11×6 км, ее гипсометрический уровень 240—280 м; почти повсеместно перекрыта меловыми отложениями, редко выходя непосредственно под четвертичные суглинки и глины. Таким образом, абсолютные высотные отметки уровней распространения коры выветривания на участках согласуются с постепенным погружением домезозойского фундамента в северном направлении. Распространение коры выветривания на Глухаринском участке показано на рис. 3.

В пределах изученных участков сохранился достаточно полный разрез коры выветривания. В этом разрезе выделяются следующие зоны (снизу вверх): 1) измененных коренных пород; 2) каолинит-гидрослюдисто-монтмориллонитовая; 3) гидрослюдисто-каолинитовая (Кочуров Л. Г., 1963 г.).

Нижняя зона — измененных коренных пород — обычно не имеет четких границ. Степень развития этой зоны определяется составом и физическим состоянием исходных пород. Минеральные компоненты коренных пород в этой зоне изменены: плагиоклазы сосюритизированы и частично каолинизированы, биотит и роговая обманка хлоритизированы. Породы в целом осветлены и обохрены, но в них отчетливо сохранились первичная полосчатость, сланцеватость и структура. Амфиболиты в этой зоне обычно зеленовато-серые до зеленовато-бурых; известняки — буро-

вато-серые. Химический состав амфиболитов и известняков этой зоны приведен в табл. 1.

Средняя зона — каолинит-гидрослюдисто-монтмориллонитовая — имеет обычно зеленые тона окраски, обусловленные присутствием в ней значительных количеств монтмориллонита и железистых гидрослюд. Границы этой зоны также не всегда определены. Минеральный состав зоны (табл. 2) характерен почти полным отсутствием амфиболов, преобладанием монтмориллонита и гидрослюдов, присутствием каолинита и почти полной каолинизацией полевых шпатов. В глинах, залегающих на известняках, весьма характерно присутствие значительных количеств кварца, графита и примеси циркона. Тяжелые фракции состоят главным образом из ильменита и эпидота. Химический состав глин средней зоны приведен в табл. 1. Содержание  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  в этих глинах в целом выше, чем в породах нижней зоны, но заметно меньше, чем в глинистом материале верхней зоны.

Верхняя зона — гидрослюдисто-каолинитовая — также не имеет четких границ и представлена главным образом разнообразными пестроокрашенными глинами. Глины этой зоны, залегающие на известняках, характерны серым цветом, обусловленным значительным присутствием графита. Кроме того, в них содержится много лимонита, гематита, кварца и иногда рутила (до 43% в тяжелой фракции). Главными минералами в глинах верхней зоны, залегающих на амфиболитах, являются каолинит и гидрослюды, кварца и графита содержится очень немного. Наиболее распространенные тяжелые минералы представлены ильменитом (до 94% тяжелой фракции), гематитом или лимонитом (до 97% тяжелой фракции) и бурой ожелезненной слюдой (табл. 2). Химический состав глин верхней зоны приведен в табл. 1. Содержание как  $TiO_2$ , так и  $Al_2O_3$  в глинах этой зоны выше, чем в зонах нижележащих. Химическими анализами в пестроцветных отложениях верхней зоны обычно всегда обнаруживается свободный глинозем в количестве нескольких процентов (табл. 3), что может свидетельствовать о латеритном характере отложений этой зоны. Содержание  $TiO_2$  иногда достигает 19%, по данным Л. Г. Кочурова (1963 г.). Наибольший практический интерес представляют участки обогащенной титаноносной коры выветривания с содержанием  $TiO_2$  выше 4%, что позволяет получать кондиционный ильменитовый концентрат.

Сложность строения коры выветривания убедительно иллюстрируется также результатами определения объемных весов, характеризующих плотность различных горизонтов профиля выветривания. Эти данные для коренных пород и их продуктов выветривания приведены в табл. 4, откуда следует, что вверх по разрезу кор выветривания, залегающих на разных коренных породах, объемные веса выветрелых продуктов уменьшаются. Такова общая картина изменения значений объемных весов в профиле выветривания района. Однако при конкретном анализе значений объемных весов по ряду скважин были установлены отклонения от упомянутой общей картины изменения плотностей для продуктов выветривания. Эти отклонения состояли в значительном (в два и более раз) увеличении значений объемных весов в сравнении со средними данными по тому или иному горизонту профиля выветривания. Н. А. Лисицына [62], изучавшая геохимию коры выветривания амфиболитов Украинского кристаллического щита, объясняет подобные отклонения тремя причинами: 1) влиянием останцов слабо выветрелых коренных пород; 2) перераспределением в процессе выветривания материнских пород значительных масс железа с образованием тел бурых железняков; 3) влиянием вторичных процессов миграции вещества (сидеритизация и т. д.). Исследованиями установлено, что указанные отклонения для изученного района также могут быть удовлетворительно объяснены этими же

Т а б л и ц а 1

Химический состав коры выветривания (в вес. %) на амфиболитах и известняках нижней подвынты терсинской свиты (Еденский участок, по данным Л. Г. Кочурова, 1963 г.)

№ сква- жины	Глубина отбора, м	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П. п. л.	Сумма	
<i>Верхняя зона—гидрослюдисто-каолиновая кора выветривания амфиболитов</i>																		
2246	12,0	33,52	29,87	9,58	3,63	9,31	1,32	0,24	0,23	0,53	0,02	0,09	0,05	Не обн.	0,13	11,33	99,90	
2238	16,4	37,80	31,80	8,43	0,23	8,11	0,60	0,16	0,06	0,08	0,01	0,17	0,25	Не отр.	0,06	12,29	100,10	
2213	17,8	40,22	31,95	4,64	0,27	7,85	0,68	0,29	0,06	0,08	0,02	0,05	0,04	0,02	0,05	13,99	100,21	
Среднее по зоне		37,01	30,97	7,55	1,37	8,42	0,87	0,23	0,12	0,25	0,01	0,11	0,11	0,01	0,08	12,54	100,36	
<i>Средняя зона—каолинт-гидрослюдисто-монтмориллонитовая кора выветривания амфиболитов</i>																		
2213	2,0	46,55	23,39	3,72	0,43	11,7	2,03	1,55	0,09	0,03	0,01	0,15	0,06	Не обн.	0,05	10,80	100,64	
2238	37,0	43,44	23,65	4,40	0,16	11,3	5,51	1,84	0,10	0,30	0,02	0,30	0,08	0,06	0,03	9,59	100,75	
2233	64,0	55,33	14,03	2,01	1,73	8,30	3,94	5,99	0,12	0,39	0,10	0,42	0,05	Не обн.	0,03	7,46	99,86	
Среднее по зоне		48,26	20,02	3,38	0,79	10,4	3,84	3,13	0,10	0,24	0,10	0,29	0,06	0,02	0,04	9,45	100,07	
<i>Средняя и верхняя зоны—кора выветривания известняка с графитом</i>																		
2236	33,0	54,45	20,89	1,42	0,54	5,21	0,73	0,63	0,09	0,13	0,03	0,78	0,09	0,22	0,05	14,61	99,87	
2231	35,6	70,66	14,16	0,64	0,47	1,31	1,07	0,33	Сл.	0,14	0,01	0,36	0,06	0,56	0,03	10,58	100,38	
2218	7,5	63,90	21,79	1,30	0,27	0,87	0,71	0,27	Сл.	0,06	0,02	0,74	0,07	0,11	0,03	10,67	100,81	
Среднее по зонам		63,00	18,95	1,12	0,43	2,46	0,84	0,41	0,03	0,11	0,02	0,63	0,07	0,30	0,04	11,95	100,36	

Таблица 1 (окончание)

№ сква- жины	Глубина отбора, м	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П. л. п.	Сумма
<i>Нижняя зона—слабо выветрелые амфиболиты</i>																	
2233	63,0	43,97	13,85	3,41	8,82	8,23	8,78	6,87	0,10	0,23	0,02	0,46	2,24	0,35	0,03	2,61	100,07
2213	37,0	49,63	13,97	2,16	6,92	5,33	8,43	8,75	0,12	0,07	0,03	0,18	3,83	—	0,04	1,02	100,53
2203	63,8	42,89	16,99	2,93	4,62	11,5	4,17	6,05	0,19	0,25	0,01	0,63	0,38	0,41	0,04	7,51	98,86
2245	11,0	45,43	13,72	2,53	4,12	8,63	5,60	7,63	0,13	0,13	0,01	0,36	1,02	Не обн.	0,02	6,41	100,54
2245	25,0	42,43	13,49	4,29	6,47	10,7	7,33	6,15	0,42	0,24	0,01	0,38	1,62	0,29	0,09	4,56	98,35
2245	32,0	47,86	14,31	3,88	3,50	11,53	6,19	3,91	0,12	0,51	0,03	0,25	3,93	Не обн.	0,03	2,52	93,57
2245	44,0	43,43	17,45	3,76	2,53	12,84	3,73	5,56	0,12	0,42	0,02	0,18	0,14	0,60	Сл.	8,81	99,64
Среднее по зоне		45,09	15,54	3,28	5,28	9,88	6,34	6,42	0,12	0,27	0,02	0,35	1,88	0,27	0,04	4,73	99,51
<i>Нижняя зона—известняки</i>																	
2245	61,5	24,92	7,52	0,97	8,03	1,72	29,34	6,93	0,10	0,11	2,65	0,12	0,76	17,8	0,05	20,02	100,29
2245	47,0	6,81	1,72	0,16	0,18	1,32	49,94	0,62	0,04	0,06	0,32	0,09	0,19	38,32	Сл.	3,43	99,88
Среднее по зоне		14,36	4,62	0,56	4,10	1,52	39,64	3,80	0,07	0,08	1,48	0,10	0,47	28,06	0,02	29,33	98,88



Т а б л и ц а 3

**Содержание свободного глинозема ( $Al_2O_3$ ) в коре  
выветривания и продуктах ее переотложения в Барзасском районе**

Объекты исследований	Число проанализированных образцов	Содержание свободного глинозема, вес. %	
		пределы колебаний	среднее
<i>А. Кора выветривания</i>			
На амфиболитах терсинской свиты	3	1,35—3,26	2,16
На известняках терсинской свиты	4	0,81—5,64	3,10
На синийских метаморфических сланцах	2	2,43—5,48	3,95
На кембрийских габбро	1	2,16	—
<i>Б. Продукты переотложения коры выветривания</i>			
Бокситы	3	25,32—36,20	31,71
Пестроцветные глины	4	2,70—26,00	10,29
Огнеупорные глины	1	0,45	—

Т а б л и ц а 4

**Результаты определения объемного веса коренных пород  
и коры выветривания на них в Барзасском районе**

Объекты исследований	Число изученных образцов	Средние значения объемного веса, $г/см^3$
<i>А. Коренные породы</i>		
Амфиболиты терсинской свиты	9	2,97
Синийские метаморфические сланцы	4	2,94
Кембрийские габбро	3	3,00
<i>Б. Кора выветривания</i>		
На амфиболитах терсинской свиты:	8	1,63
нижние непереотложенные горизонты	5	1,73
средние и верхние переотложенные горизонты	3	1,51
На известняках терсинской свиты (переотложенная кора выветривания)	3	1,53
На синийских метаморфических сланцах:	4	1,72
нижние непереотложенные горизонты	1	1,83
средние и верхние переотложенные горизонты	3	1,69
На кембрийских габбро:	3	1,67
нижние непереотложенные горизонты	2	1,70
средние переотложенные горизонты	1	1,65
Бурый железняк	3	3,05
Горизонты сидеритизации	2	2,64

причинами. В подтверждение сказанного следует указать на повышенные значения объемных весов для бурых железняков и горизонтов сидеритизации, присутствующих как в верхних, так и в нижних частях профиля выветривания (рис. 4—8). По предложению Н. А. Лисицной [62] установленные отклонения в распределении объемных весов по профилю

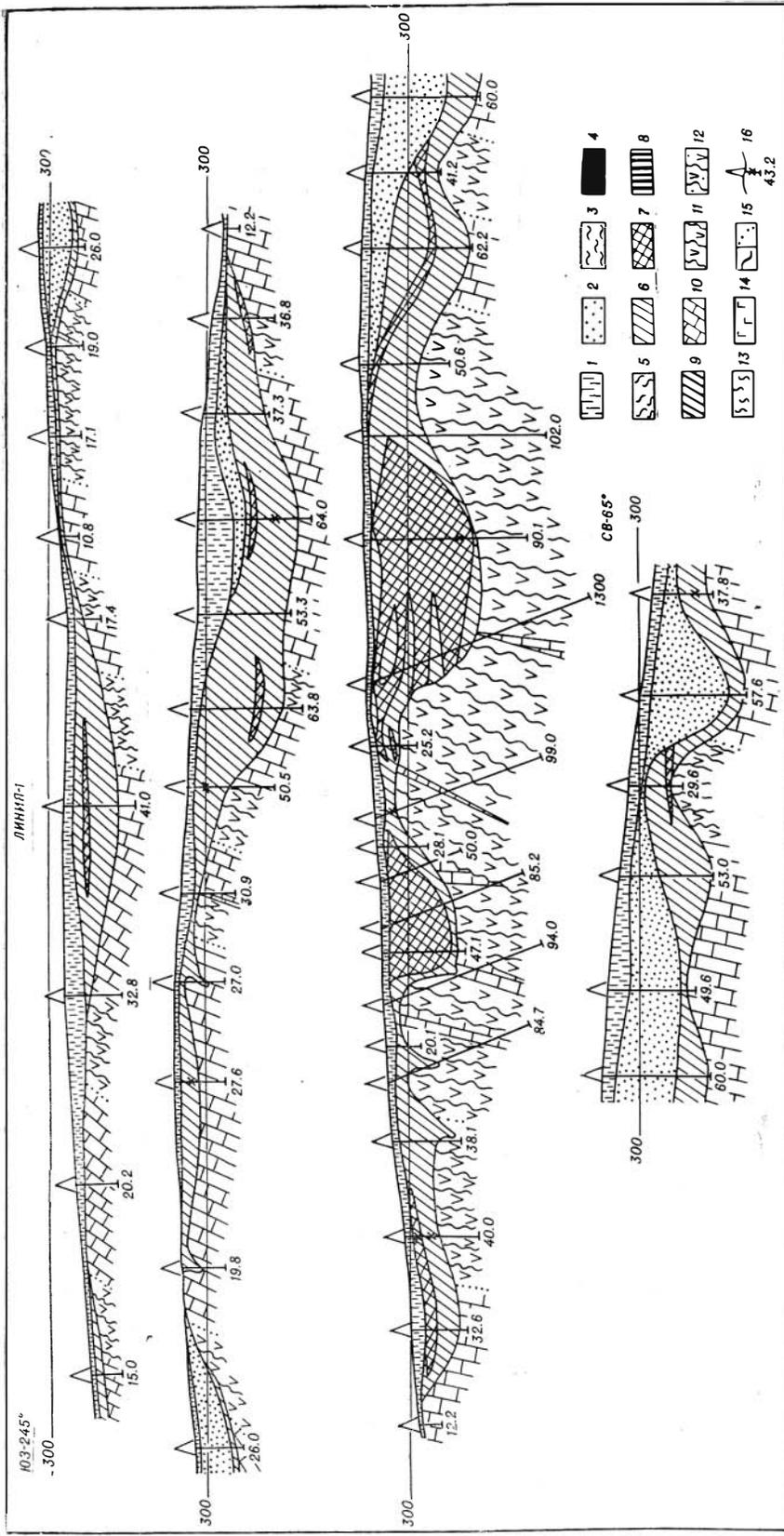


рис. 4. Еденский участок. Разрез по линии 1. Геологические разрезы составлены с использованием материалов Л. Г. Кочурова (1963 г.)

1 — четвертичные суглинки, глины; 2 — песчано-галечные отложения симоновской свиты сидеритизации; породы фундамента: 10 — известняки; 11 — амфиболиты (Сг<sub>2</sub>sm); кийская свита (Сг<sub>1</sub>ks); 3 — глины белые, бокситовые; 4 — бокситы; 5 — глины красные, желтые, пестрые, кора выветривания (Сг<sub>1</sub>); 6 — глины пестроветвельные; 7 — уча- стки обогащенной титановой коры выветривания; 8 — бурый железняк; 9 — горизонт-

ты сидеритизации; породы фундамента: 10 — известняки; 11 — амфиболиты Рич<sub>2</sub>; 12 — амфиболиты Рич<sub>2</sub>; 13 — слитные метаморфические сланцы; 14 — табор; 15 — геологические границы, прослеженные по выработкам (слева) и предполагаемые (справа); 16 — скважины: отметка забоя в м; крестик — место отбора керн в пробу

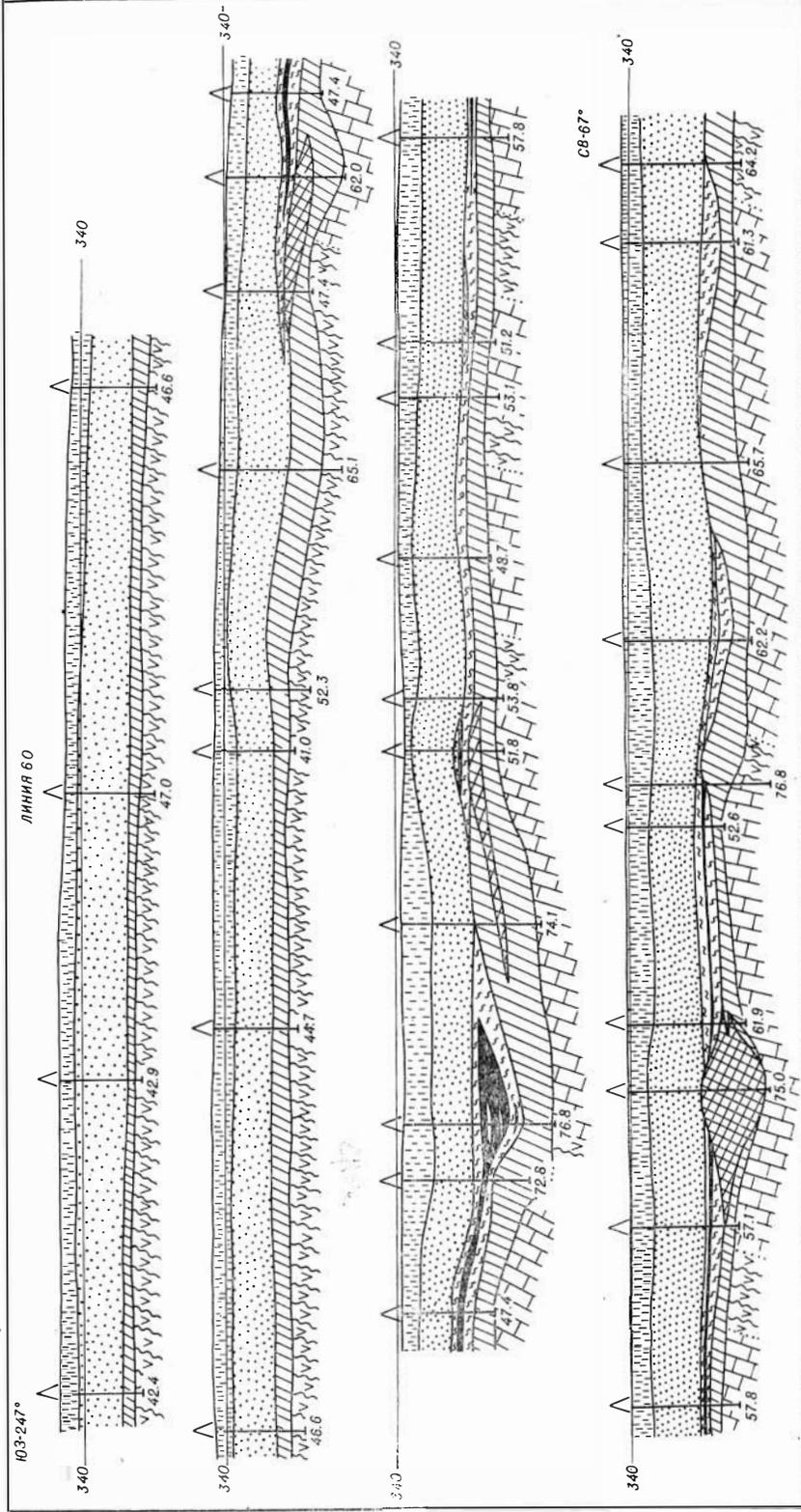


Рис. 5. Суховской участок. Разрез по линии 60. Условные обозн. см. на рис. 4



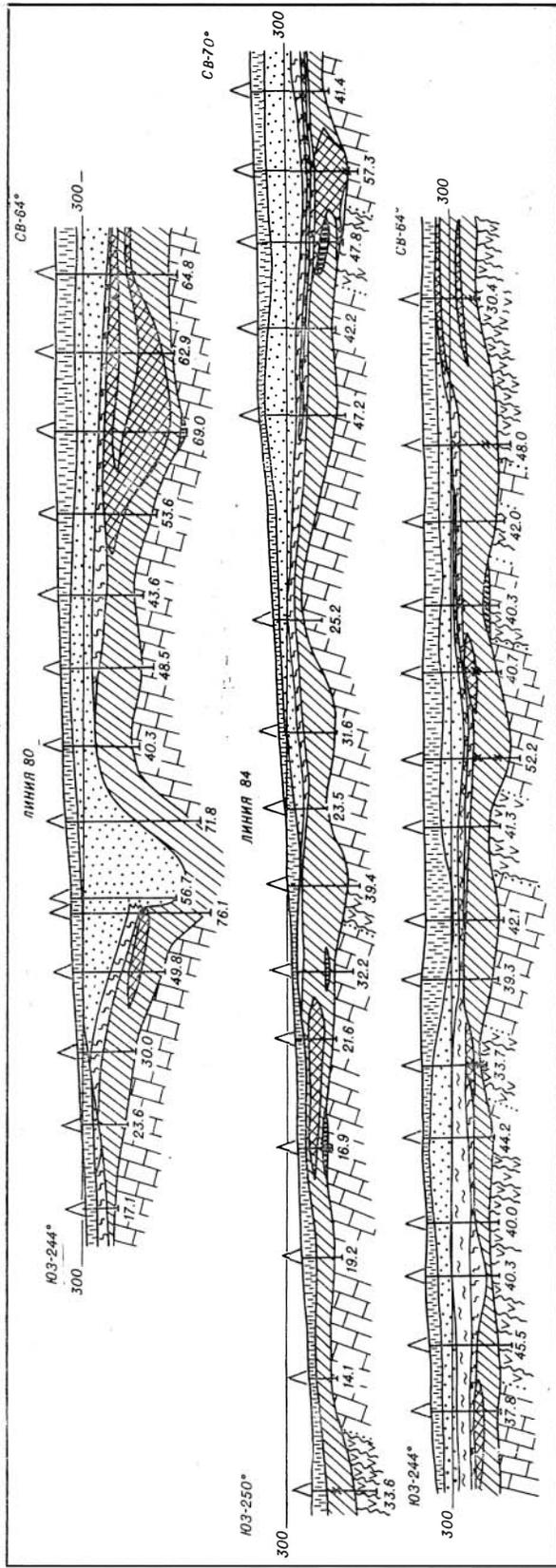


Рис. 7. Глухаринский участок. Разрез по линии 80, 84. Условные обозн. см. на рис. 4

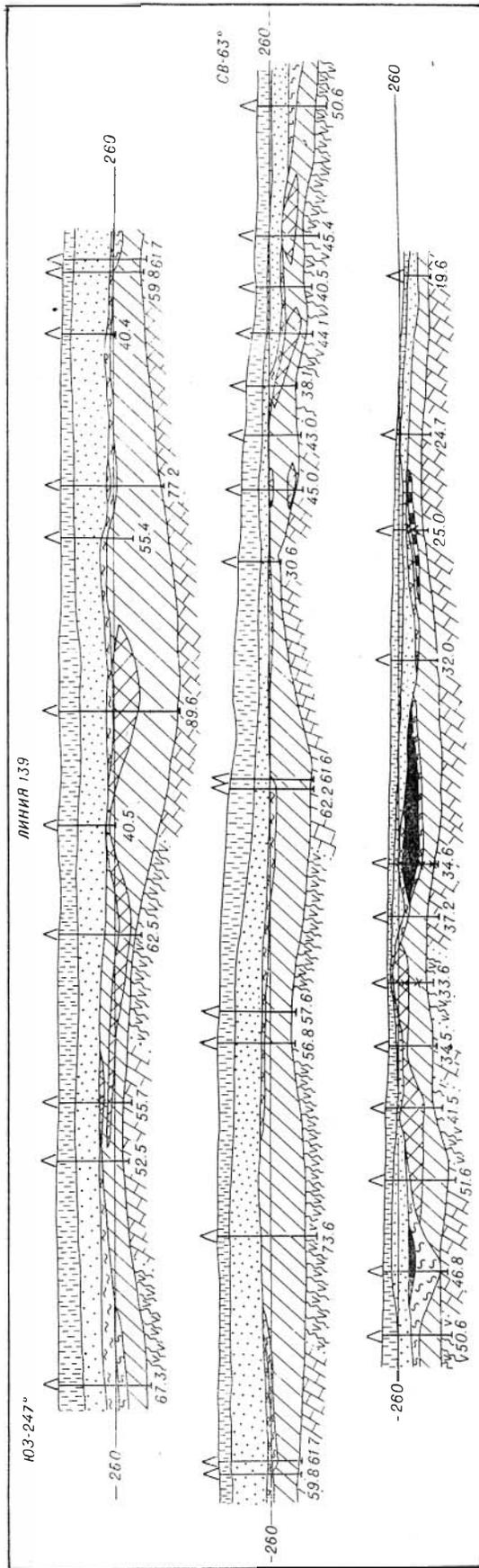


Рис. 8. Гавриловский участок. Разрез по линии 139. Условные обозн. см. на рис. 4

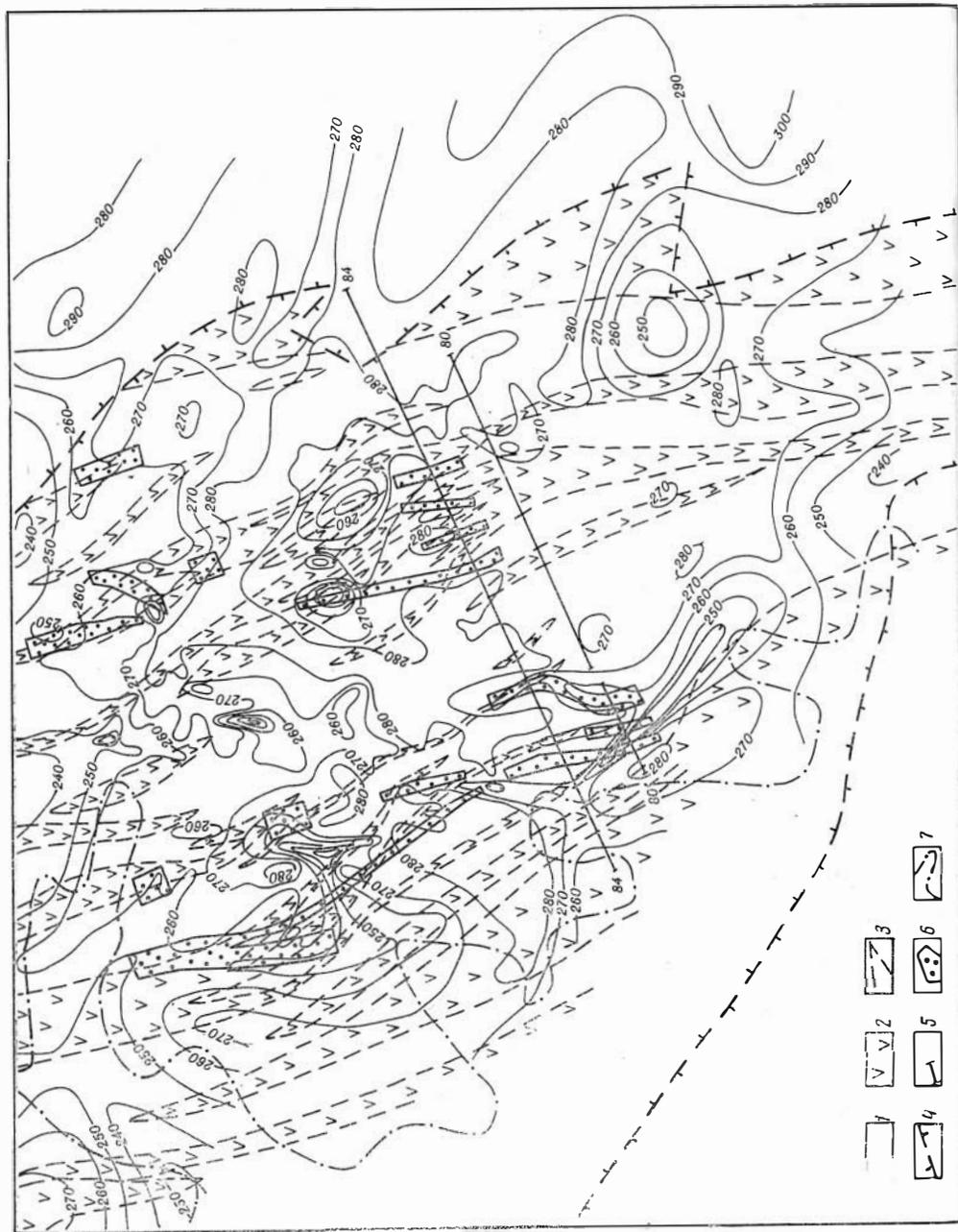


Рис. 9. Глухаринский участок.  
Карта рельефа прогрозойско-  
го фундамента. Составлена по  
материалам Л. Г. Кочурова  
(1963 г.)

- 1 — известняки;
- 2 — амфиболиты (Ртп);
- 3 — геологические границы;
- 4 — тектонические нарушения;
- 5 — линии разрывов и их номера;
- 6 — участки обогатенной титано-  
носной коры выветривания;
- 7 — граница распространения коры  
выветривания. Изогипсы прове-  
дены через 10 м

выветривания учитывались при изучении поведения исследуемых элементов в процессе выветривания.

Нижнемеловой возраст коры выветривания, залегающей в пределах изученных участков главным образом на докембрийских породах, устанавливается по аналогии с соседней Ампалькской впадиной, где продукты выветривания заключены между флористически охарактеризованными отложениями илекской ( $C_{T_1}^{il}$ ) и кийской ( $C_{T_1}^{ks}$ ) свит (Луппов, 1958 г., 1961 г.; Файнер, 1956 г.).

Для выяснения условий залегания коры выветривания были построены по материалам Барзасской экспедиции ЗСГУ геологические разрезы вкрест простирания структур фундамента (рис. 4—8), для Глухаринского участка — карта рельефа протерозойского фундамента (рис. 9) и карта изомощностей коры выветривания (рис. 10). Анализ геологических разрезов позволяет отметить следующее.

Породы фундамента представлены главным образом протерозойской толщей переслаивающихся амфиболитов и известняков нижней подсвиты терсинской свиты. Породы иного возраста и состава — амфиболиты верхней подсвиты терсинской свиты, синийские сланцы и кембрийские габбро — слагают небольшие площади. Контакты между различными литологическими разновидностями пород очень крутые и достигают 70—80° с падением на юго-запад.

Кора выветривания распространена на всех породах фундамента, причем мощность ее значительно варьирует: от 3—4 до 80—100 м. Средняя мощность коры выветривания на участках 30 м. Максимальной мощности профиль выветривания достигает в углублениях и впадинах, образующихся среди известняков, в зонах повышенной трещиноватости среди амфиболитов и сланцев, а также на контактах различных по составу пород, главным образом известняков и амфиболитов. Помимо увеличения мощности выветрелой толщи в углублениях и впадинах фундамента, здесь наблюдаются также значительно более интенсивные изменения состава исходных пород, нежели в сравнительно тонком покрове выветривания, распространенном на широких площадях. Именно в таких углублениях и впадинах устанавливается полный разрез коры выветривания, представленный всеми тремя описанными выше зонами. В то же время в составе выветрелой толщи сравнительно небольшой мощности, распространенной на литологически близких по составу породах (рис. 6), присутствуют в основном только гидрослюдистые, монтмориллонитовые или гидрослюдисто-монтмориллонитовые с небольшой примесью каолина глины нижних зон коры выветривания. Приуроченность интенсивно выветрелых пород большой мощности к крутопадающим породам фундамента и к контакту их различных литологических разновидностей следует объяснять, как полагает Н. А. Лисицына [54], двумя причинами: во-первых, тем, что крутозалегающие породы значительно легче пропускают поверхностные воды, которые проникают по их слоистости, растворяют и изменяют их состав; во-вторых, по границе разных по составу толщ интенсивнее развиваются разрывные нарушения, которые также способствуют проникновению растворов в глубь породы.

На карте рельефа протерозойского фундамента, составленной для Глухаринского участка, можно видеть, что эта поверхность имеет сложный характер: крайняя неровная, с глубокими воронкообразными углублениями. Углубления располагаются согласно с северо-западным простиранением пород фундамента и приурочены либо к участкам развития известняков, либо к контактам известняков и амфиболитов. Размеры углублений (впадин) в плане обычно не превышают 200—250 м, глубина 20—50 м, редко 100 м. Располагаясь часто цепочкой по простиранию пород фундамента, впадины тем не менее не образуют единых долинообразных углублений, так как разделяются между собой возвышенными участка-

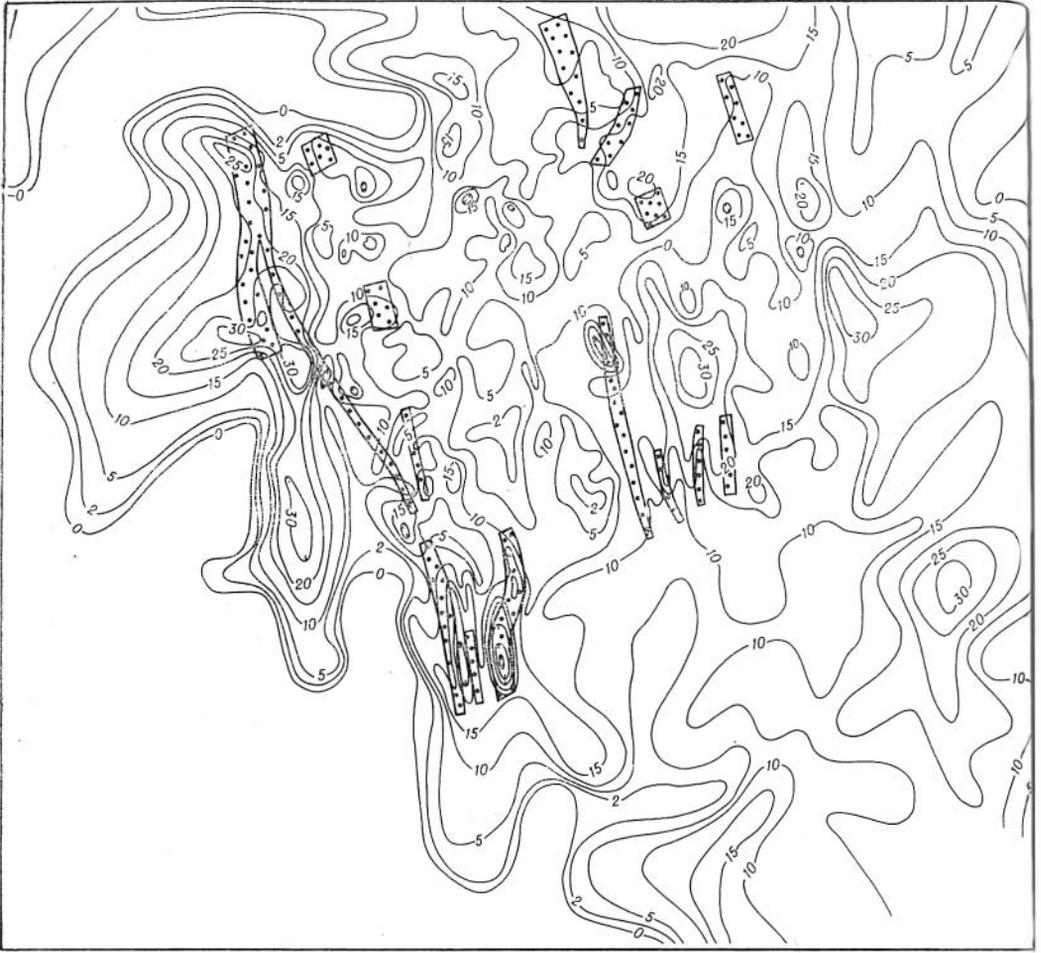


Рис. 10. Глухаринский участок. Карта изомощностей коры выветривания. Составлена по материалам Л. Г. Кочурова (1963 г.). Линии изомощностей проведены через 5,3 и 2 м. Условные обозн. см. на рис. 9

ми. Карта изомощностей коры выветривания (рис. 10) наглядно подтверждает то положение, что мощности профиля выветривания тесно увязываются с рельефом фундамента (рис. 9). Максимальные мощности коры выветривания устанавливаются, как правило, во впадинах фундамента. Иногда увеличение мощности профиля выветривания отмечается для возвышенных участков, сложенных часто чередующимися крутопадающими прослоями известняков и амфиболитов, нередко разрушенных тектоническими нарушениями. Подтверждение этому можно видеть на западном и восточном флангах Глухаринского участка (рис. 10). Рассмотрение карты рельефа протерозойского фундамента Глухаринского участка в сочетании с картой изомощностей коры выветривания дает представление о рельефе поверхности коры выветривания. Можно говорить, что рельеф кровли коры выветривания очень тесно связан с рельефом протерозойского фундамента. Впадины на поверхности коры выветривания обычно совпадают со впадинами в фундаменте, разделяются превышениями в 30–50 и более метров и, таким образом, также не образуют единых долинообразных углублений. Достаточно расчлененный рельеф фундамента обусловил не только частое изменение мощностей в

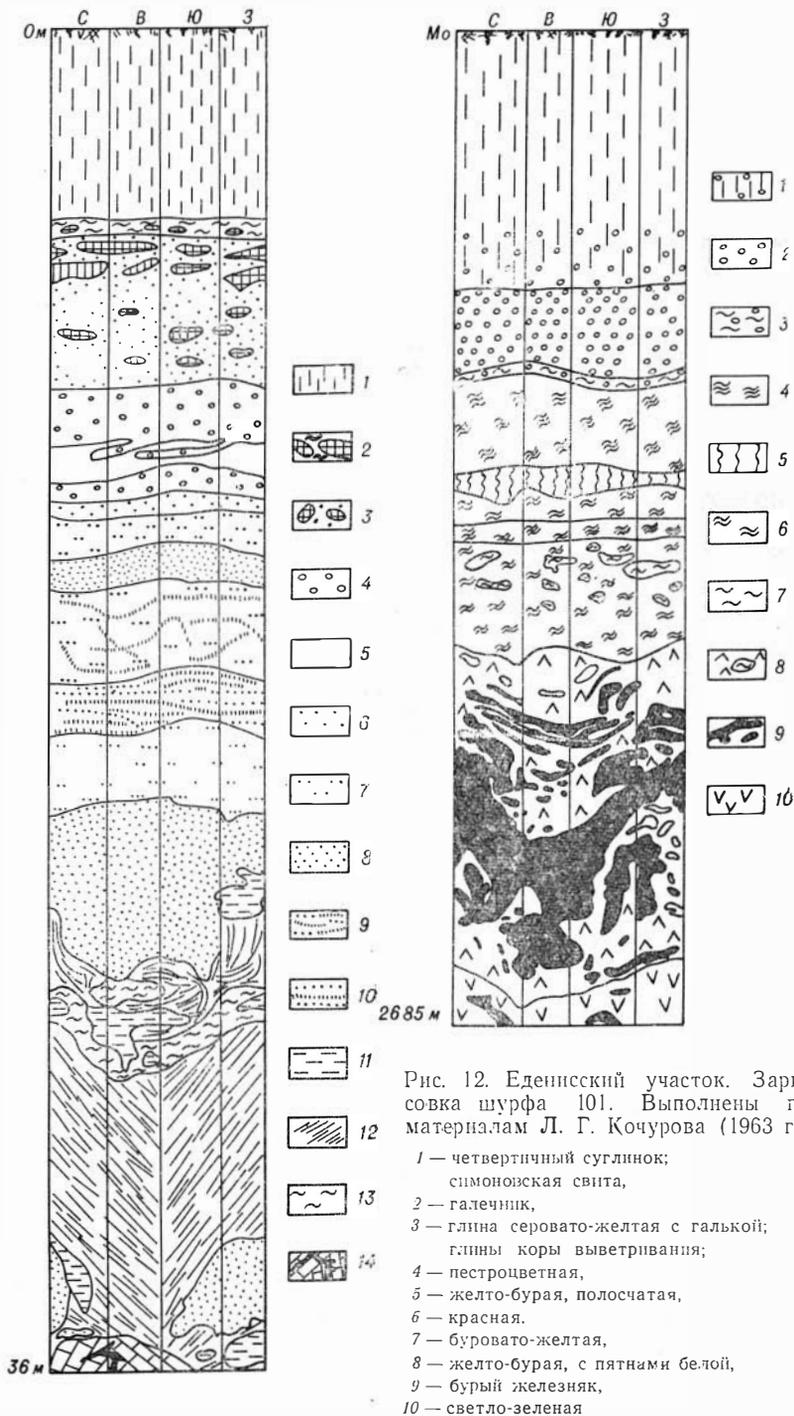


Рис. 11. Еденский участок. Зарисовка шурфа 120

1 — четвертичные суглинки; симоновская свита ( $Ст_2^{sm}$ ); 2 — глина с обломками железистого песчаника; 3 — песок с обломками песчаника и конгломерата; 4 — галечник; 5 — глина белая; кийская свита ( $Ст_1^{ks}$ ); разновидности боксита: 6 — рыхлый, белый, 7 — рыхлый, желтый, 8 — рыхлый, буровато-желтый, 9 — рыхлый, с прослойками каменистого, 10 — каменистый, выветрелый, с прослойками крестового; глины коры выветривания ( $Ст_1$ ): 11 — серая, 12 — желто-бурая, полосчатая, 13 — пестроцветная, 14 — коренной известняк с прожилками бурого железняка

Рис. 12. Еденский участок. Зарисовка шурфа 101. Выполнены по материалам Л. Г. Кочурова (1963 г.)

1 — четвертичный суглинок; симоновская свита, 2 — галечник, 3 — глина серовато-желтая с галькой; глины коры выветривания; 4 — пестроцветная, 5 — желто-бурая, полосчатая, 6 — красная, 7 — буровато-желтая, 8 — желто-бурая, с пятнами белой, 9 — бурый железняк, 10 — светло-зеленая

профиле выветривания, но и явления переотложения коры выветривания, особенно ее верхних горизонтов. Термин «переотложенная кора» в настоящей работе трактуется в понимании И. И. Гинзбурга [24]. Переотложенный характер коры выветривания в ряде случаев подтверждается следующими фактами.

1. Залеганием коры выветривания амфиболитов на известняках, причем на последних часто располагаются участки обогащенной титаноносной коры выветривания, хотя достоверно устанавливается, что известняки не могут служить источником титана (рис. 4—8).

2. Присутствием в выветрелой толще разнообразных по крупности и форме обломков известняка, амфиболитов, сланцев, измененных в различной степени, иногда до состояния глин.

3. Расположением слоев и линзочек черного шлиха в плоскости, секущей полосчатость нижележащего структурного элювия коренных пород.

4. Частой перемежаемостью глин разного цвета и структуры в виде пластов, линз, пятен, а также в форме крупных обломков и глыб (рис. 11). Нередко наблюдаемая полосчатость в глинах часто ориентирована несогласно с простираем известняков (рис. 12).

Следует отметить, что перемещение материала в процессе переотложения коры выветривания было незначительным и, вероятно, не превышало первых сотен метров. Признаки аллювиальных отложений в переотложенных корах выветривания отсутствуют.

Остаточная, непереотложенная, кора выветривания по распространенности значительно уступает переотложенной, слагая наибольшие по площади участки в составе нижних горизонтов профиля выветривания.

Таким образом, распространение и условия залегания профиля выветривания определяются характером поверхности фундамента. Кровля коры выветривания достаточно полно повторяет рельеф фундамента. Максимальные мощности выветрелой толщи устанавливаются в отдельных изолированных впадинах, располагающихся либо среди известняков, либо на контактах известняков и амфиболитов. Значительная расчлененность рельефа фундамента обуславливает большую роль переотложения материала в процессе формирования коры выветривания. Анализ карт рельефа фундамента и изомощностей коры выветривания для других участков подтверждает сделанные выводы.

### **Распространение, строение и условия залегания продуктов переотложения коры выветривания (бокситов, глин)**

Продукты переотложения коры выветривания в пределах изученных участков слагают кийскую свиту. Осадки свиты тесно связаны с корой выветривания на амфиболитах и известняках нижней подсвиты терсинской свиты и почти отсутствуют в пределах распространения других толщ домезозойского фундамента. Кийские отложения с размывом залегают на неровной поверхности коры выветривания, занимая главным образом пониженные участки, а также слагая небольшие площади на водораздельных пространствах. Разрез свиты представляется в следующем виде (снизу вверх) [111].

1. Глины пестроцветные, переотложенные.
2. Глины буро-красные, бокситоносные.
3. Бокситы рыхлые, глинистые, каменные.
4. Глины светлые, слабо бокситоносные, огнеупорные. Общая мощность разреза колеблется от 10 до 80 м. Глины являются главной частью свиты, составляя 90% от общего ее объема.

Пестроцветные глины залегают в основании кийской свиты непосредственно на коре выветривания. Они представлены плотными пестроокрашенными разностями с характерной брекчиевидной текстурой за счет присутствия угловатых обломков выветрелых пород фундамента.

По данным литологических исследований (Кочуров, 1963 г.), пестроцветные глины на 90% сложены пелитовым гидрослюдисто-каолинит-гетитовым материалом. В составе тяжелых фракций этих глин присутствуют ильменит (56,0—68,0%); гетит (23,0—36,0%); рутил (до 5%); циркон (2,0—4,0); лейкоксен (до 1,0%) и иногда сидерит. Средний химический состав пестроцветных глин приведен в табл. 5.

Буро-красные бокситоносные глины подстилают бокситы, а также часто переслаиваются с ними или замещают их по простирацию. Помимо бокситов, в разрезе этих глин устанавливаются маломощные (0,1—0,5 м) прослойки гематита и алюможелезистых пород. Буро-красные глины состоят из каолинита, гетита, гематита с переменным количеством гидраргиллита. Вблизи бокситов глины приобретают отчетливое оолитовое строение. Количество оолитин в них изменяется от 2 до 50%. По составу оолиты гетитовые (черные) или гидраргиллитовые (бурые). Содержание свободного глинозема возрастает вверх по разрезу горизонта, по направлению к бокситам. Средний химический состав буро-красных бокситоносных глин приведен в табл. 5.

Бокситы согласно залегают на буро-красных глинах, образуя тела линзовидной формы. Обычно это бурые, реже светлые породы бобовой текстуры с преобладанием рыхлых разностей (50%), чередующихся с каменистыми (30%) и глинистыми (20%). Во всех разновидностях бокситов обнаруживаются элементы обломочной структуры [58, 108, 111]. По минералогическому составу барзасские бокситы относятся к гидраргиллитовому типу. Главными порообразующими минералами в них являются гидраргиллит, каолинит, гематит и гетит; второстепенными — кварц, сидерит, лейкоксен, магнетит и фосфаты алюминия из группы гойяцита; акцессории представлены эпидотом, рутилом, цирконом. Средний химический состав бокситов по выделенным разновидностям приведен в табл. 5. Бокситы иногда фациально переходят в алюможелезистые образования. Последние представлены плотными и мелкооолитовыми породами, состоящими из гетитовых и гиббситовых оолитин, погруженных в гетит-каолинит-гиббситовый цемент. Средний химический состав алюможелезистых пород приведен в табл. 5.

Светлые, слабо бокситоносные глинистые отложения слагают верхний горизонт кийской свиты и включают промышленные запасы огнеупорных глин. В основании этого горизонта залегают глины, имеющие оолитовое строение и обычно сопровождающие бокситы. Эти глины состоят из гидраргиллитовых оолитин, сцементированных глинистой основной массой, имеющей каолинитовый состав с примесью гидраргиллита, циркона, ильменита, рутила. По качеству большая часть оолитовых глин являются высокоглиноземистыми огнеупорами. Залегающие выше белые плотные каолинитовые безоолитовые глины венчают разрез кийской свиты. Они имеют пелитовую или псамито-пелитовую структуру слагающего их материала, представленного в основном каолинитом с примесью чешуй гидрослюды; гидраргиллит отсутствует. С этими глинами связаны месторождения основных огнеупоров. Химический состав глин верхнего горизонта приведен в табл. 5.

Для описанного разреза кийской свиты, по заключению ряда исследований [108, 111], очень характерны частая смена и взаимопереходы одних пород в другие, происходящие на коротких расстояниях.

Нижнемеловой (апт-альбский) возраст отложений кийской свиты достаточно точно устанавливается на основании определения соответ-

Средний химический состав (вес. %) (по данным Л. Г. Кочурова, 1963 г.)

Характер отложений	Число про-анализиро-ванных проб	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>вал</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>
Глины пестроцветные	25	36,96	30,12	2,14	17,37	16,26
Глины буро-красные	20	31,74	29,20	2,30	22,17	21,95
Бокситы рыхлые	40	15,27	42,75	3,37	15,46	Не опр.
Бокситы каменные	35	9,00	31,24	3,33	24,73	» »
Бокситы глинистые	25	16,30	43,13	3,69	14,11	» »
Алломожелезистые породы	17	17,93	36,64	3,40	21,67	» »
Глины оолитовые красновато-бурые	20	34,30	40,60	2,65	2,50	» »
Глины безоолитовые, белые	15	43,43	35,30	3,23	3,48	» »

ствующих споро-пыльцевых комплексов (Луппов, 1958 г., 1961 г.; Файнер, 1956 г.).

На приведенных геологических разрезах (рис. 4—8) видно, что бокситоносные отложения кийской свиты залегают главным образом в углублениях коры выветривания, приуроченных в основном к контакту известняков и амфиболитов. На повышенных выровненных участках эти отложения распространены нешироко.

Поверхность коры выветривания, описанная выше на примере Глухаринского участка (рис. 10), является ложем для бокситоносных осадков. Неровный характер этой поверхности объясняет значительные колебания в мощностях бокситов и сопровождающих их глин (от 10 до 80 м), а также залегание этих отложений на различных гипсометрических уровнях. Кроме того, расчлененный рельеф ложа бокситоносных отложений обуславливает большую роль процессов механического перемещения материала при их образовании. Это подтверждается следующими фактами.

1. Присутствием брекчиевых разновидностей бокситов, в которых остроугольные или слабоокатанные обломки каменных бокситов сцементированы бокситовым же веществом.

2. Наличие обломков боксита, залегающих среди глин коры выветривания, в основании кийской свиты ниже рудных горизонтов (рис. 11).

3. Существование бокситовых обломков, сохранивших реликтовые структуры материнских пород.

Для бокситов Енисейского края, образовавшихся в сходных геологических условиях, К. В. Боголепов [10] указывает также следующие признаки их переотложения: а) связь бокситов с широко представленными (особенно на Мало-Мурожнинском месторождении) делювиальными фациями и отложениями временных потоков; б) наличие в разрезах Татарской группы месторождений бокситовых песков, представляющих продукты механического размыва и переотложения латеритной коры выветривания. Учитывая мощности переслаивающихся пачек амфиболитов и известняков терсинской свиты, на коре выветривания которых залегают бокситоносные осадки Барзасского района, следует считать, что перемещение материала при их образовании не превышало первых сотен метров. Признаки аллювиальных отложений, предполагающих перенос материала на значительные расстояния, среди бокситоносных отложений отсутствуют. Поверхность бокситоносной пачки почти полностью повторяет особенности рельефа коры выветривания, но в сглаженной форме.

Таблица 5

отложений кийской свиты на изученных участках  
и Д. И. Емельяновой, 1961 г.)

FeO	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	П. п. п.	Сумма
0,33	0,17	0,03	0,01	0,09	0,13	—	11,02	93,9
0,21	0,17	0,11	0,02	0,33	0,82	0,14	13,05	100,1
Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	21,53	93,9
» »	» »	» »	» »	» »	» »	» »	21,35	93,7
» »	» »	» »	» »	» »	» »	» »	21,53	93,7
» »	» »	» »	» »	» »	» »	» »	13,71	93,3
» »	» »	» »	» »	» »	» »	» »	16,45	93,8
» »	» »	» »	» »	» »	» »	» »	14,73	100,2

Уже отмечалось, что максимальные мощности бокситоносных осадков устанавливаются в углублениях (впадинах, котловинах) коры выветривания (скв. 206, рис. 6; скв. 1780, рис. 8), к которым и приурочены основные массы глин и бокситов кийской свиты. Стенки и дно впадин сложены обычно не коренными породами, а крутопадающими глинами коры выветривания. Крутизна бортов впадин достигает иногда 60—70°, что значительно превышает углы естественного откоса глин. Крутые углы наклона слоистости устанавливаются также для глин в самой бокситоносной пачке. Как отмечает Н. А. Лисицына [54], подобные особенности строения впадин не позволяют считать их образовавшимися до формирования бокситов и глин. Этот вывод подтверждается также фактом резкого различия в мощностях бокситоносных отложений, залегающих во впадинах (мощностью 20—30 м) и на возвышенных участках (мощностью 1—3 м). По мнению Н. А. Лисицыной [54], прогибание уже отложившихся бокситоносных осадков благодаря последующим процессам карстообразования не может объяснить резкого увеличения мощности этих отложений в воронках часто более чем в 10 раз. Отмеченные особенности строения впадин и бокситоносных толщ, залегающих в них, могут быть удовлетворительно объяснены предположением о постепенном выполнении впадин в процессе их развития [54]. Именно такой точки зрения в отношении условий заполнения впадин бокситоносными осадками придерживаются также А. Н. Волков [23], К. В. Боголепов и Е. И. Пельтек [11].

Таким образом, бокситоносные отложения кийской свиты в пределах изученных участков тесно связаны в своем распространении с корой выветривания, развитой на амфиболитах и известняках нижней подсвиты терсинской свиты. Осадки этой свиты чаще всего залегают в изолированных впадинах рельефа фундамента, где кора выветривания достигает максимальной мощности и представлена наиболее глубоко измененными породами. По морфологическим признакам эти впадины имеют карстовое происхождение и заполняются бокситоносным материалом главным образом в процессе их развития. Достаточно расчлененный рельеф ложа бокситоносных осадков кийской свиты обуславливает, как и для коры выветривания, большую роль переотложения материала в процессе их формирования.

По условиям залегания бокситы и глины Барзасского района близки бокситам Казахстана [54, 23], а также бокситоносным отложениям Енисейского края [11, 10, 4].

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТИТАНА В КОРЕННЫХ ПОРОДАХ РАЙОНА

В пределах изученных участков среди коренных пород наиболее распространены протерозойские амфиболиты терсинской свиты. Они слагают 90% площади домезозойского фундамента района. Синийские метаморфические сланцы и кембрийские габбро распространены нешироко (рис. 1). Поэтому основное внимание уделено изучению распределения титана в амфиболитах терсинской свиты.

### Поведение титана в метаморфических процессах

Поведение титана в метаморфических процессах изучено слабо. Можно считать, что до настоящего времени условия образования метаморфогенных концентраций титана исследованы значительно в меньшей степени, чем условия формирования титановых концентраций магматического и экзогенного происхождения. Поэтому перед изложением фактического материала представляется целесообразным кратко осветить (по литературным данным) основные положения о поведении титана в процессах метаморфизма [73, 37, 38, 20, 105].

Большинством исследователей признается, что миграция титана при процессах метаморфизма, особенно регионального, не характерна. Предположения относительно значительного перемещения титана при прогрессивном региональном метаморфизме следует считать дискуссионными. Достоверное проявление миграции титана устанавливается только в специфических условиях гидротермальных и контактово-метасоматических процессов [9, 42, 107]. Минералогические формы титана в метаморфических породах определяются минеральным и химическим составом исходных пород и физико-химическими условиями их преобразования. Энергетический анализ процессов образования титановых минералов при метаморфизме [73] дает основание заключить, что появление самостоятельных минералов титана (а также железа) имеет место тогда, когда слагающие их компоненты пересыщают породы, т. е. находятся в избытке по отношению к количеству, которое при данных условиях температуры, давления и состава может быть израсходовано на образование энергетически более выгодных соединений. Появление тех или иных собственных титановых минералов зависит также от формы присутствия в породах железа, кальция и кремния, принимающих участие в образовании самостоятельных минералов титана. Так, сфен при метаморфизме появляется в породах, содержащих кварц или калиевый полевой шпат, а также кальций-цветные минералы. Ильменит обычен в метаморфических породах, пересыщенных железом и не содержащих кальций-цветных минералов, избыточных кварца и калиевого полевого шпата. Перовскит, как правило, обнаруживается в породах с кальций-цветными минералами при недосыщении их кремнием. Рутил появляется при условии отсутствия одновременно кальций-цветных минералов и кварца (калишпата), а также недосыщения пород железом (отсутствие фаялита) [73].

При метаморфизме основных пород в условиях амфиболитовой и эклогитовой фаций большая часть титана выделяется в виде самостоятельных минералов: ильменита и рутила. При этом силикаты почти полностью освобождаются от титана как изоморфной примеси, и происходит распад твердых растворов ильменит — гематит и магнетит — ильме-

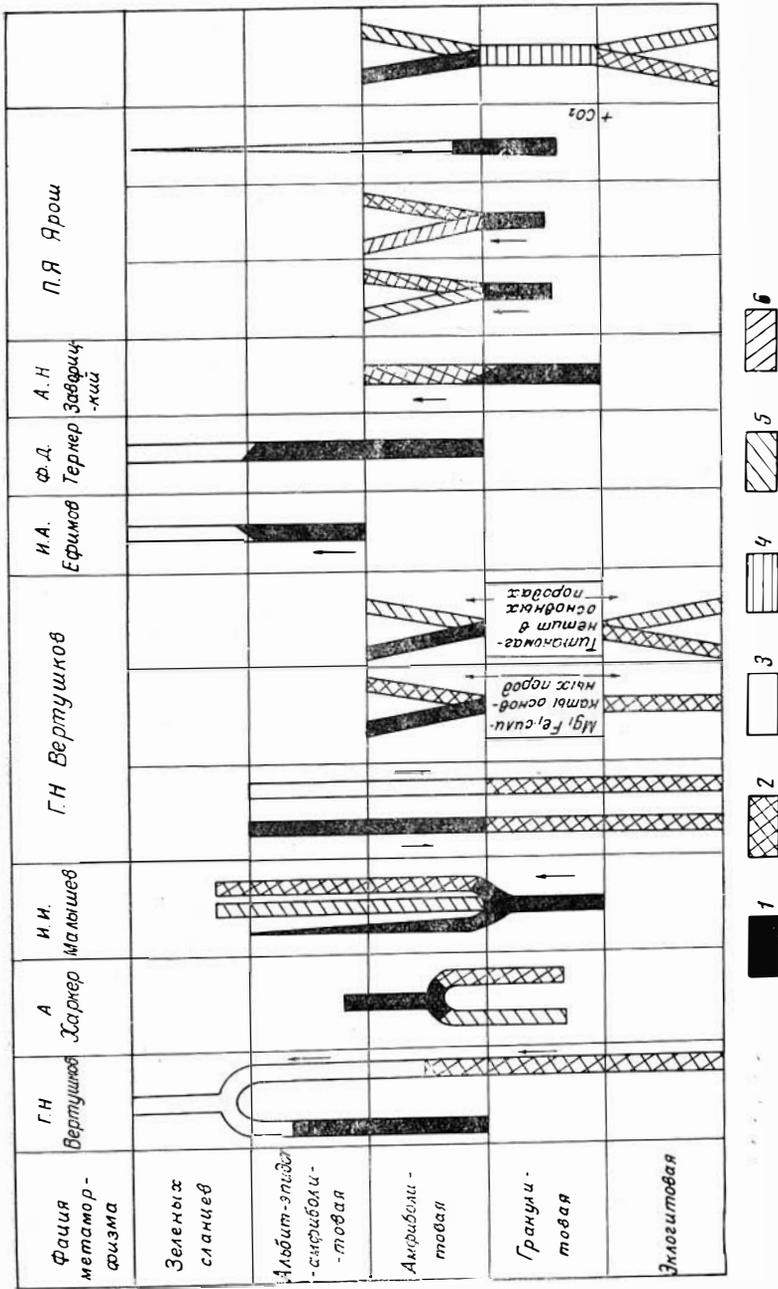


Рис. 13. Схема замещения титановых минералов в различных фациях регионального метаморфизма. По И. А. Ефимову [38]  
 1 — ильменит; 2 — рутил; 3 — рутил; 4 — титаномангнетит; 5 — магнетит; 6 — гематит. Стрелкой указано направление процесса метаморфизма: прогрессивный региональный (стрелка вниз) и ретроградный (стрелка вверх)

нит. Собственные титановые минералы перекристаллизовываются, становятся более крупными, а титаномагнетит превращается в ильменит-магнетитовый агрегат. Кроме того, в этих же условиях метаморфизма могут образовываться силикаты с высоким содержанием железа (роговые обманки, гранаты, эпидоты и другие), при этом сначала полностью замещаются силикатами магнетит и гематит. Если процесс на этом остановится, то возникают вкрапленные ильменитовые руды. При дальнейшем развитии в породах силикатов, богатых железом, может происходить заимствование железа из ильменита, что часто приводит к образованию рутила за счет ильменита. Как отмечает В. Н. Вертушков, в амфиболитизированных породах габбро-диабазового состава в Уфалейском районе на Урале наибольшее количество рутила наблюдается, как правило, в тех разностях указанных пород, в которых почти нет непрозрачных рудных минералов (магнетита, гематита, ильменита), а за счет роговых обманок начинают развиваться в умеренном количестве листовые силикаты (биотит, мусковит). По существу в таких условиях метаморфизма идет тот же процесс разделения железа и титана, который наблюдается в коре выветривания и россыпях при образовании лейкоксена по ильмениту, только при метаморфизме двуокись титана образует более крупные кристаллики рутила [20].

Наиболее распространенными минералами титана в метаморфических породах являются ильменит, рутил, сфен, реже титано-магнетит. Соотношения этих минералов в разных фациях метаморфизма различны и представлены на рис. 13. Как видно из приведенной схемы, распределение минералов титана по фациям метаморфизма разными исследователями трактуется по-разному. Тем не менее достаточно определенно намечается общая закономерность: по мере возрастания температуры образования метаморфических фаций в них происходит замена наиболее распространенных титановых минералов, представленных сначала сфеном, затем ильменитом, а в гранулитовой и эклогитовой фациях — главным образом рутилом. С энергетической точки зрения такое распределение наиболее распространенных титановых минералов по фациям метаморфизма рассмотрено В. М. Немцовичем [73].

### **Краткая петрографическая характеристика коренных пород района**

Амфиболиты терсинской свиты внешне представляют собой породы с ясно выраженной сланцеватостью, реже массивные, темно-зеленого или серо-зеленого цвета. Главными составляющими в амфиболитах нижней подсвиты являются обыкновенная роговая обманка и плагиоклаз (андезин-олигоклаз); в амфиболитах верхней подсвиты — актинолит и плагиоклаз более кислого состава (олигоклаз-альбит). Менее распространены в этих породах эпидот, цоизит, карбонат, альбит, серицит, кварц, клиноцоизит, калиевый полевой шпат. В еще меньших количествах в них присутствуют апатит, циркон, сфен, рутил, ильменит, магнетит. Некоторые разности амфиболитов содержат значительные количества сульфидов, представленных главным образом пиритом, пирротинном и халькопиритом. Количественные содержания наиболее распространенных минералов в амфиболитах терсинской свиты показаны в табл. 9. Наиболее часто в амфиболитах устанавливаются структуры немато- и лепидобластовая, реже гранонематобластовая и лепидогранобластовая. По вещественному составу амфиболиты терсинской свиты следует отнести к продуктам метаморфизма основных пород, возникшим в условиях фаций зеленых сланцев (амфиболиты верхней подсвиты) и эпидот-амфиболитовой (амфиболиты нижней подсвиты) [73].

Среди метаморфических сланцев енисейской свиты наиболее распространены тонкорассланцеванные разновидности темного, серого и зеленовато-серого цвета. Под микроскопом они обнаруживают тонко- и мелкозернистое строение, исключающее возможность провести надежный количественно-минералогический подсчет. Поэтому баланс титана и других элементов-гидролизатов в этих породах не рассматривается. По данным Г. Ф. Горелова и Л. М. Мысиной (1960 г.), метаморфические сланцы енисейской свиты часто настолько сильно изменены динамометаморфизмом, что их первоначальный состав при микроскопических исследованиях определяется с трудом. Среди тонко- и мелкозернистой основной массы кварц-серицит-хлоритового состава устанавливаются более крупные (до 0,1 мм) выделения роговой обманки, эпидота, хлорита, плагиоклаза (альбита). Из минералов титана в некоторых шлифах присутствует только сфен; рудные непрозрачные минералы представлены обычно пиритом.

Габбро представлено средне- и крупнозернистыми массивными породами темно-серой, серой и зеленовато-серой окраски. Наиболее распространены роговообманковые габбро с гнейсовидной текстурой. Эти породы состоят из сильно измененного плагиоклаза, сосюритизированного и серицитизированного, и обыкновенной роговой обманки; редко обнаруживается моноклинный пироксен. Вторичные минералы развиваются главным образом по плагиоклазу и представлены хлоритом, эпидотом, цоизитом. В очень незначительных количествах присутствуют ильменит, сфен, титаномагнетит, магнетит и апатит. Наиболее распространенные структуры — габбровая и гипидноморфнозернистая. Результаты количественно-минералогического подсчета в габбро приведены в табл. 9.

Титановые минералы в коренных породах района представлены ильменитом, сфеном, рутилом и титаномагнетитом.

*Ильменит* является самым распространенным титановым минералом. Он присутствует во всех коренных породах, но наиболее высокие его содержания обычны для амфиболитов нижней подсвиты терсинской

Таблица 6

Содержание титановых минералов (в кг/т) в коренных породах района

Коренные породы	Количество изученных проб-протоочек	Ильменит		Сфен		Рутил		Титаномагнетит	
		пределы колебаний	среднее						
Амфиболиты нижней подсвиты терсинской свиты	30	р.з.—42,7	15,7	р.з.—0,3	0,1	р.з.—0,9	0,2	р.з.—0,1	р.з.
Амфиболиты верхней подсвиты терсинской свиты	10	р.з.—2,0	0,5	р.з.—11,5	1,0	р.з.—0,1	р.з.	р.з.—0,3	р.з.
Синийские метаморфические сланцы	5	р.з.—0,1	р.з.	— р.з.	р.з.	— р.з.	р.з.	— р.з.	р.з.
Кембрийские габбро	3	— р.з.	р.з.	р.з.—3,7	0,3	— р.з.	р.з.	р.з.—0,5	0,1

Примечание. Прочерк означает, что минерал отсутствует.

свиты (табл. 6, 9). Характерно, что в этих породах ильменит распространен крайне неравномерно. Содержание этого минерала в протоочках, отобранных из керна скважин с интервалом всего в 1 м, может изменяться от редких зерен до 19,0 кг/т. Ильменит в амфиболитах нижней подсвиты терсинской свиты присутствует главным образом в мелких неправильных зернах, реже образует вытянутые выделения, ясно ксеноморфные по отношению к амфиболу. Преобладающий размер зерен ильменита 0,04—0,10 мм. При исследовании в отраженном свете устанавли-

вается, что ильменит характеризуется хорошо заметным двуотражением и плеохроизмом. Он совершенно не содержит никаких микровключений, а также признаков двойникования и изменения (лейкоксенизации). Согласно Рамдору [98], можно полагать, что образование неизмененного ильменита в изученных амфиболитах следует объяснять перекристаллизацией зерен этого минерала или титаномагнетита, находившихся в исходных породах. Содержание ильменита в других коренных породах района очень низкое (табл. 6, 9), а его оптические свойства обычные.

*Сфен* также является одним из самых распространенных титановых минералов и присутствует во всех коренных породах района. Однако повышенное количество этого минерала устанавливается главным образом для амфиболитов верхней подсвиты терсинской свиты (табл. 6, 9), образовавшихся при метаморфизме основных пород в условиях фации зеленых сланцев. В амфиболитах верхней подсвиты терсинской свиты сфен присутствует обычно в очень мелких зернах неправильной формы. Преобладающий размер таких зерен 0,02—0,07 мм. Иногда зерна сфена образуют скопления в форме цепочек длиной до 0,6—1,0 мм. Чаще всего сфеновые зерна и их скопления встречаются на участках развития темноцветных минералов (главным образом амфиболов) и на контактах этих минералов с плагиоклазами. Значительно реже обнаруживаются более крупные (до 0,15—0,20 мм) кристаллы сфена «конвертообразного» или ромбовидного облика, плохо образованные, с неровными матовыми гранями. Цвет зерен и кристаллов сфена желтый и медово-желтый. Содержание сфена в других коренных породах невелико и обычно не превышает редких зерен — нескольких грамм на тонну.

*Рутил* является обычным минералом титана при метаморфизме основных пород в условиях эпидот-амфиболитовой фации [73] и в повышенных количествах (до 0,9 кг/т) присутствует только в амфиболитах нижней подсвиты терсинской свиты (табл. 6). Содержания рутила в других коренных породах очень низкое, и количество этого минерала в изученных протолочках редко превышает редкие зерна. Рутил в амфиболитах нижней подсвиты терсинской свиты присутствует в форме мелких (0,02—0,07 мм) вытянутых кристалликов красного цвета, иногда с заметной грубой штриховкой на гранях.

*Титаномагнетит* устанавливается в габбро, а в других коренных породах района практически отсутствует. Содержания титаномагнетита в габбро низкие и, как правило, редко превышают редкие зерна (табл. 6). При минераграфическом изучении устанавливается, что титаномагнетит, представляющий тонкие пластинчатые прорастания ильменита в магнетите, может быть обнаружен только при самых больших увеличениях. Толщина пластинок ильменита изменяется от десятых долей микрона до 0,02 мм; обычно она бывает менее одного микрона. Ильменитовые пластинки располагаются в магнетите, как правило, в двух направлениях, образуя характерные решетчатые структуры распада. В титаномагнетитах магнетитовая составляющая по количеству резко преобладает над ильменитовой, а иногда замещается гематитом; в таких случаях зерна титаномагнетита становятся анизотропными с мозаично-пластинчатым угасанием. Размер зерен титаномагнетита изменяется от 0,02 до 0,2 мм.

### Распределение Ti, Al, Nb, Ta, Th и Fe в коренных породах района

Содержания указанных элементов и их соотношения в коренных породах приведены в табл. 7 и показаны на рис. 14. Анализируя приведенные данные, отметим следующее.

1. Повышенные количества титана устанавливаются в амфиболитах терсинской свиты. В них содержание  $TiO_2$  достигает 4,19%. В этих же породах отмечаются наибольшие изменения в содержаниях  $TiO_2$ : от 0,84 до 4,19%. Минимальные количества титана находятся в габбро, а содержание  $TiO_2$  в этих породах колеблется очень незначительно — от 0,57 до 0,80%. Аллюминий в коренных породах распределен относительно равномерно. В большинстве анализированных проб (около 80% от их общего числа) содержание  $Al_2O_3$  изменяется в узком интервале: от 13,0 до 16,5%. Только в единичных пробах из амфиболитов нижней подсвиты терсинской свиты и синийских сланцев содержание  $Al_2O_3$  опускается до 8,87—10,75%. В габбро, имеющих иногда в своем составе повышенное количество основного плагиоклаза (до 64,7%), содержание  $Al_2O_3$  относительно других коренных пород несколько повышено и варьирует от 19,24 до 22,82%. Ниобий, тантал и торий в коренных породах содержатся в очень незначительных количествах и распределены в них весьма равномерно. Наименьшие колебания в содержаниях устанавливаются для тантала (от  $0,62 \cdot 10^{-4}$  до  $1,22 \cdot 10^{-4}\%$ ) и тория (от  $1,25 \cdot 10^{-4}$  до  $4,5 \cdot 10^{-4}\%$ ). Содержание ниобия в амфиболитах нижней подсвиты терсинской свиты относительно сланцев и габбро повышается в 3—5 раз и составляет  $15,0 \cdot 10^{-4}$ — $20,0 \cdot 10^{-4}\%$ . Как отмечалось выше, в этих же амфиболитах устанавливается также повышенное количество титана. Двух- и трехвалентное железо в коренных породах, за исключением габбро, распределены сравнительно неравномерно, причем в распределении трехвалентного железа отмечается большая неравномерность. Так, крайние значения содержания  $Fe_2O_3$  (окисное) составляют 0,36 и 30,16% и в большинстве проб содержание этого окисла изменяется от 2,5 до 8%. Содержание же  $FeO$  в основной массе проб варьирует в более узком интервале: от 3,5—4,0 до 7,5—8,0%, а крайние значения содержания этого окисла составляет 3,07 и 12,68%. В габбро как двух-, так и трехвалентное железо распределены равномерно и пределы изменения содержания составляют: для  $Fe_2O_3$  (окисное) — от 3,24 до 4,75%; для  $FeO$  — от 5,17 до 6,35%.

2. Значения отношений титана к другим элементам-гидролизатам, а также к железу в различных коренных породах различны (табл. 7, рис. 14). Тем не менее в распределении значений этих отношений достаточно определенно устанавливается, что они имеют наибольшие пределы колебаний в амфиболитах терсинской свиты, характеризующихся неравномерным распределением титана, а наименьшие — в габбро, где титан распределен весьма равномерно. Так, значения отношений  $TiO_2/Al_2O_3$  изменяются: в амфиболитах терсинской свиты — от 0,05 до 0,31, в габбро — от 0,02 до 0,04. В тех же породах значения отношений  $Ti/Nb$  варьируют соответственно от  $9,9 \cdot 10^2$  до  $29,0 \cdot 10^2$  и от  $12,0 \cdot 10^2$  до  $19,0 \cdot 10^2$ .

Описанные изменения в содержании изучаемых элементов в коренных породах района, а также изменения в отношениях между этими элементами в тех же породах иллюстрируются соответствующими значениями коэффициентов вариации (табл. 8).

3. Графическое изображение соотношения содержания титана с другими элементами-гидролизатами и железом в коренных породах района показывает (рис. 15), что можно говорить о прямой пропорциональной зависимости между содержаниями титана и двухвалентного железа, ниобия и тория. Такой зависимости между содержаниями титана и трехвалентного железа, алюминия и тантала не устанавливается. Это подтверждается также соответствующими значениями коэффициентов корреляции между этими элементами (табл. 8):

Отмеченные особенности в распределении титана и других элементов-гидролизатов, а также железа связаны с разными минералогическими

Таблица 7

## Содержание титана, других элементов-гидролизатов и железа и их соотношения в коренных породах района

Коренные породы	n, вес. %													
	TiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>		FeO		Nb		Ta		Th	
	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее
Амфиболиты нижней подсвиты терсинской свиты	1,28—4,19	2,24 (27)*	9,77—17,87	14,93 (27)	0,36—30,16	4,53 (27)	3,07—12,68	8,60 (27)	4,5—13,9	9,8 (4)	0,78—1,22	1,03 (4)	1,25—3,25	2,3 (13)
Амфиболиты верхней подсвиты терсинской свиты	0,34—1,76	1,35 (5)	13,54—16,12	14,66 (5)	2,69—6,70	5,01 (5)	5,09—8,75	6,71 (5)	1,4—2,0	1,7 (2)	0,62—1,63	1,12 (3)	1,5—2,3	1,98 (5)
Синийские метаморфические сланцы	0,46—1,37	1,04 (3)	8,37—15,35	12,94 (3)	3,20—10,9	7,44 (3)	3,79—7,66	6,20 (3)	4,0—4,0	4,0 (4)	0,9—0,9	0,9 (4)	1,25—4,50	2,44 (3)
Кембрийские габбро	0,57—0,0	0,70 (4)	19,24—22,82	20,44 (4)	3,24—4,75	4,12 (4)	5,17—6,35	5,76 (4)	2,5—2,5	2,5 (2)	0,71—0,78	0,74 (2)	2,3—2,3	2,3 (3)

Коренные породы	n, 10 <sup>-2</sup>											
	TiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		TiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>		TiO <sub>2</sub> /FeO		Ti/Nb		Ti/Ta		Ti/Th	
	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее
Амфиболиты нижней подсвиты терсинской свиты	0,03—0,26	0,14 (27)	0,04—10,44	0,55 (27)	0,13—1,13	0,25 (27)	9,9—29,3	18,7 (4)	113,1—229,6	162,0 (4)	37,4—97,8	58,4 (13)
Амфиболиты верхней подсвиты терсинской свиты	0,05—0,12	0,09 (5)	0,20—0,39	0,27 (5)	0,12—0,26	0,20 (5)	25,0—57,1	44,0 (2)	80,6—129,0	104,8 (2)	33,6—70,4	42,48 (5)
Синийские метаморфические сланцы	0,05—0,08	0,07 (3)	0,05—0,40	0,19 (3)	0,06—0,36	0,19 (3)	6,7—6,7	6,7 (1)	30,0—30,0	30,0 (1)	52,0—65,7	59,2 (3)
Кембрийские габбро	0,02—0,04	0,03 (4)	0,12—0,24	0,17 (4)	0,10—0,14	0,12 (4)	12,0—19,2	15,6 (2)	47,8—61,5	54,6 (2)	14,8—20,8	17,6 (3)

\* Здесь и далее в скобках указано число анализов, из которых выведено среднее значение.

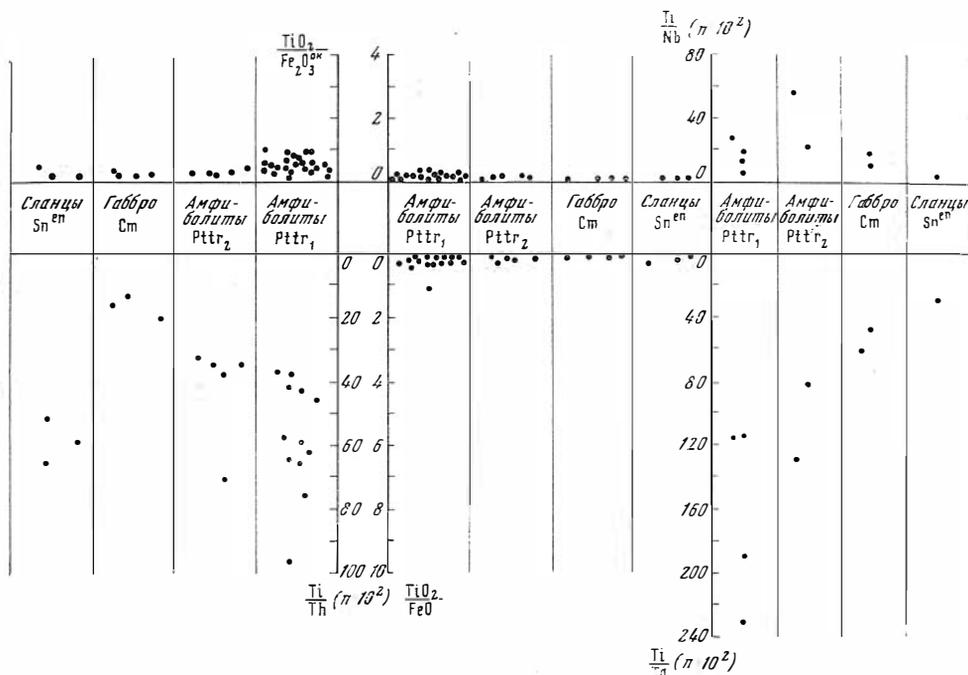


Рис. 14. Значения отношений  $TiO_2/Al_2O_3$ ,  $TiO_2/Fe_2O_3^{ок}$ ,  $TiO_2/FeO$ ,  $Ti/Nb$ ,  $Ti/Ta$  и  $Ti/Th$  в коренных породах

формами нахождения этих элементов в коренных породах района. Согласно исследованиям А. Б. Ронова и А. А. Мигдисова [103], в коренных породах можно выделить три группы минералов, различающихся между собой содержанием и соотношением заключенных в них изучаемых элементов.

Первая группа — **с а л и ч е с к и е** минералы — представлена плагиоклазами, которые являются концентраторами алюминия. Количество других элементов-гидролизатов в минералах этой группы невелико, так как они практически не допускаются в их кристаллическую структуру.

Вторая группа — **ф е м и ч е с к и е** минералы (обыкновенная роговая обманка, актинолит, хлорит, биотит) — характеризуется одновременным вхождением в их кристаллическую структуру всех исследуемых элементов-гидролизатов, содержания которых связаны между собой прямой пропорциональной зависимостью. Кроме того, в фемических минералах концентрируется значительная часть железа главным образом в двухвалентной форме.

Третья группа — **а к ц е с с о р н ы е** и **р у д н ы е** минералы (рутил, сфен, ильменит) — обладает высокими содержаниями титана и других элементов-гидролизатов (за исключением алюминия), как правило, изоморфно замещающих друг друга. Алюминий для минералов этой группы не характерен и может присутствовать только в очень незначительных количествах.

Различные пропорции салических, фемических, акцессорных и рудных минералов определяют характер распределения  $Ti$ ,  $Al$ ,  $Nb$ ,  $Ta$  и  $Th$ , а также  $Fe$  и их соотношения в коренных породах района. Для более полной характеристики распределения указанных элементов нами были выполнены подсчеты их баланса для разных по составу коренных пород (табл. 9, рис. 16). Такие подсчеты дают возможность отметить следующее.

Значения коэффициентов вариации и корреляции для изучаемых окислов

Объекты исследований	Значения коэффициентов вариации для изучаемых окислов, %						
	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
Амфиболиты Pt <sup>tr1</sup>	32,0	12,0	99,0	25,0	33,0	13,0	19,0
Амфиболиты Pt <sup>tr2</sup>	24,0	5,0	30,0	20,0	30,0	25,0	22,0
Метаморфические сланцы Sp	23,0	24,0	53,0	34,0	—	—	20,0
Габбро Cm	15,0	8,0	16,0	9,0	—	6,0	10,0

Коренные породы района (в целом)

Примечание. Здесь и далее в таблицах прочерк означает, что данные отсутствуют.

1. В амфиболитах терсинской свиты основная масса титана (70,0—90,0%) связана с собственными минералами этого элемента — ильменитом и сфеном. Неравномерный характер распределения этих минералов, являющийся следствием неравномерного их распределения в исходных породах (Кочуров, 1963 г.), а также, вероятно, благодаря влиянию процессов метаморфизма, обуславливает также неравномерность в распределении содержаний и отсутствие корреляционной связи этого элемента с Al, Ta и Fe<sup>3+</sup> в амфиболитах. В роговой обманке и актинолите, являющихся самыми распространенными породообразующими минералами, заключено не более 30% общего количества титана, содержащегося в породах. С этими породообразующими минералами связаны практически весь торий, а также значительная часть (до 55,0—95,0%) двухвалентного железа. Можно полагать, что вхождение этих элементов в структуру самых распространенных темноцветных минералов амфиболитов и широко проявленный изоморфизм с титаном объясняют установленную прямую пропорциональную зависимость между Ti и Fe<sup>2+</sup>, Ti и Th (рис. 15). Ниобий в амфиболитах связан главным образом с ильменитом, изоморфная емкость которого в отношении этого элемента велика и одинакова с таковой для биотита [114], являющегося в ряде случаев основным концентратором ниобия [44]. Связь ниобия с устойчивыми к выветриванию минералами титана для нефелиновых сиенитов Арканзасского района (США) доказана Гордоном и Мюрата [130]. Тантал, помимо вхождения в структуру темноцветных минералов [50], в значительных количествах может быть связан с цирконом, присутствующим в амфиболитах, а также со сфеном, где изоморфизм этого элемента с титаном проявляется легче, чем в темноцветных минералах или ильмените [114]. Надо полагать, что разная степень вхождения ниобия и тантала в различные титановые, акцессорные и породообразующие минералы амфиболитов обуславливает установленные различия в связях между Ti и Nb, Ti и Ta. Отсутствие надежных данных по содержанию Nb и Ta в минералах амфиболитов не позволяет однозначно решить затронутый вопрос. Трехвалентное железо в количестве до 40% от общего содержания в амфиболитах присутствует в роговой обманке (актинолите). Следует считать, что значительная доля Fe<sup>3+</sup> может быть связана с разнообразными гидроокислами железа, которые иногда в изобилии развиваются в исследованных породах по роговой обманке, магнетиту, титаномagnetиту и сульфидам (пириту, пирротину). Алюминий в амфиболитах распределяется примерно в равной мере между роговой обманкой и плагиоклазами.

(элементов) и отношений между ними в коренных породах района

Значения коэффициентов вариации для отношений изучаемых окислов, %						Значения коэффициентов корреляции (r) для пар изучаемых окислов					
$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{Ti}_2\text{O}}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$						
33,0	212,0	65,0	75,0	35,0	23,0						
23,0	27,0	30,0	24,0	16,0	35,0	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$
14,0	30,0	39,0	—	—	12,0						
10,0	15,0	16,0	20,0	9,0	11,0						
						-0,11 ±0,01	-0,14 ±0,01	+0,47 ±0,04	+0,64	+0,26	+0,40

2. В габбро, содержащем небольшое количество титановых минералов (главным образом сфена), описанная картина распределения элементов существенно отличается для титана.

Этот элемент в габбро концентрируется главным образом в роговой обманке; количество его, связанное со сфеном, не превышает 30%. Тем не менее прямой корреляционной связи титана с алюминием в габбро не устанавливается (рис. 15). Учитывая результаты исследований А. Б. Ронова и А. А. Мигдисова [103], это обстоятельство следует объяснять значительным содержанием в этих породах плагиоклазов (до 65,0%, возможно, больше), в которых из элементов-гидролизатов концентрируется главным образом алюминий. В габбро отсутствует также связь между Ti и Th вследствие возможного вхождения значительного количества Th в плагиоклазы, практически лишенных Ti.

### Основные выводы

1. Протерозойские амфиболиты терсинской свиты, являющиеся самыми распространенными коренными породами в районе, обогащены титаном в сравнении с синийскими метаморфическими сланцами и кембрийскими габбро. Титан в амфиболитах распределен неравномерно.

2. Характер распределения титана и других элементов-гидролизатов (Al, Nb, Ta и Th), а также железа зависит от минералогических форм присутствия этих элементов в коренных породах. Из элементов-гидролизатов только титан образует собственные минералы, представленные ильменитом, сфеном, рутилом, титаномагнетитом. Остальные элементы—гидролизаты входят изоморфно в кристаллическую структуру породообразующих минералов—амфиболов (Th, Nb и Ta) или плагиоклазов (Al, Th), а также в минералы титана (Nb, Ta). Железо в двухвалентной форме связано главным образом с амфиболами; значительная доля трехвалентного железа может находиться в продуктах окисления роговой обманки, магнетита, титаномагнетита и сульфидов (пирита, пирротина).

3. Присутствие основной массы (до 90%) титана в амфиболитах в форме собственных минералов, распределенных неравномерно, определяет неравномерность распределения этого элемента в этих породах, а также нарушения его корреляционных связей с другими элементами-гидролизатами (Al, Ta) и железом ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Отсутствие взаимосвязи между титаном и алюминием в габбро, практически не содержащем

Распределение Ti, Al и Fe\* по минералам в коренных породах района

Минерал	Содержание минерала в породе, вес. %	Количество оксидов в минерале, приходящееся на 1 г породе, мг				Процент оксидов, приходящийся на данный минерал				Общее содержание оксидов в породе					
		TiO <sub>2</sub>		FeO		TiO <sub>2</sub>		FeO		TiO <sub>2</sub>		FeO		n, %	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>
Роговая обманка	74,56	66,95	7,90	68,71	13,77	43,13	18,32	82,39	18,8	155,2	1,88	15,52	4,31	8,33	
Плагиоклаз	14,07	33,37	0,47	0,23	0,05	17,93	1,09	0,27	43,1	83,8					
Ильменит	2,9	—**	—	13,63	0,90	—	—	16,32							
Сфен	р.з.	—	—	—	—	—	—	—							
<b>Сумма</b>	<b>94,52</b>				<b>99,72</b>	<b>66,56</b>	<b>19,41</b>	<b>98,98</b>							
Роговая обманка	56,11	50,33	2,44	67,50	8,96	35,55	63,00	56,34							
Плагиоклаз	32,10	82,97	1,09	0,54	0,03	59,05	30,27	0,45	37,5	140,5	3,75	14,05	0,36	11,93	
Ильменит	8,13	—	—	33,77	75,00	—	—	32,36							
Сфен	1,43	—	0,05	0,12	15,94	—	1,33	0,10							
<b>Сумма</b>	<b>97,33</b>				<b>99,93</b>	<b>94,90</b>	<b>99,65</b>	<b>99,25</b>							
Роговая обманка	39,10	35,1	1,26	47,03	6,24	21,93	35,00	39,25							
Плагиоклаз	31,23	80,72	1,06	0,53	0,03	53,45	29,44	0,45							
Бноит	20,60	33,46	1,26	37,32	11,92	24,37	35,00	31,15	37,5	140,5	3,75	14,05	0,36	11,9	
Ильменит	5,51	—	—	26,03	77,36	—	—	21,76							
Сфен	р.з.	—	—	—	—	—	—	—							
<b>Сумма</b>	<b>96,44</b>				<b>95,60</b>	<b>99,80</b>	<b>99,44</b>	<b>92,61</b>							
Роговая обманка	81,14	72,96	3,6	75,85	27,77	46,23	26,95	32,00							
Плагиоклаз	15,50	40,06	0,5	0,26	0,05	25,45	1,63	0,23	17,5	157,4	1,75	15,74	3,19	9,2	

## Амфиболиты нижней подвытты терсинской свиты

Ильменит	3,35	12,60	—	—	15,85	72,16	—	—	17,13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Сфен	р.з.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<b>Сумма</b>	<b>99,99</b>					<b>99,93</b>	<b>74,73</b>	<b>23,53</b>	<b>99,41</b>										
Роговая обманка	72,27	4,33	64,99	7,66	76,9	26,24	44,17	35,62	75,90										
Плагиоклаз	22,21	0,02	57,41	0,75	0,37	0,12	36,42	3,43	0,35	16,5	157,6	21,5	101,2	1,65	15,76	2,15	10,1		
Ильменит	4,96	12,04	—	—	23,43	73,0	—	—	23,20										
Сфен	р.з.	—	—	—	—	—	—	—	—										
<b>Сумма</b>	<b>99,44</b>					<b>99,36</b>	<b>77,59</b>	<b>39,10</b>	<b>99,46</b>										
Роговая обманка	70,17	4,21	63,01	7,43	54,41	19,0	45,07	13,99	64,27										
Плагиоклаз	17,06	0,01	44,10	0,53	0,29	0,04	31,54	1,09	0,32	22,1	139,8	53,1	88,8	2,21	13,93	5,31	8,8		
Ильменит	12,75	17,63	—	—	33,35	80	—	—	37,55										
Сфен	р.з.	—	—	—	—	—	—	—	—										
<b>Сумма</b>	<b>99,93</b>					<b>99,03</b>	<b>76,61</b>	<b>15,03</b>	<b>99,14</b>										
Роговая обманка	30,69	1,34	27,55	3,25	24,94	7,44	16,40	4,22	42,15										
Плагиоклаз	27,41	0,02	70,85	0,93	0,46	0,03	42,19	1,20	0,77	24,7	167,9	77,0	59,4	2,47	16,79	7,70	5,9		
Хлорит	31,59	1,26	64,15	9,60	19,60	5,10	31,20	12,46	33,00										
Ильменит	4,18	21,43	—	—	13,66	87,0	—	—	23,29										
<b>Сумма</b>	<b>93,87</b>					<b>99,62</b>	<b>93,79</b>	<b>17,33</b>	<b>99,21</b>										
Роговая обманка	62,69	3,76	55,29	6,64	75,41	22,73	34,47	22,05	99,57										
Плагиоклаз	25,72	0,02	66,43	0,37	0,43	0,12	40,76	2,89	0,54	16,5	163,3	30,1	73,9	1,65	16,33	3,01	7,9		
Сфен	5,0	—	—	0,17	0,42	77,00	—	0,56	0,53										
<b>Сумма</b>	<b>93,41</b>					<b>99,90</b>	<b>75,23</b>	<b>25,50</b>	<b>93,64</b>										
Роговая обманка	61,13	3,66	54,89	6,47	73,53	19,57	35,13	31,25	57,93										
Плагиоклаз	34,13	0,03	30,60	1,06	0,53	0,16	51,66	5,12	0,41	13,7	156,0	20,7	126,8	1,87	15,6	2,07	12,63		
Ильменит	6,06	14,96	—	—	23,63	80,00	—	—	22,61										
Сфен	р.з.	—	—	—	—	—	—	—	—										
<b>Сумма</b>						<b>99,73</b>	<b>86,84</b>	<b>36,37</b>	<b>81,00</b>										

Т а б л и ц а 9 (продолжение)

Минерал	Содержание минерала в порошке, вес. %	Количество оксидов в минерале, приходящее на 1 г порошка, мг				Процент оксидов, приходящийся на данный минерал				Общее содержание оксидов в порошке					
		TiO <sub>2</sub>		FeO		TiO <sub>2</sub>		FeO		TiO <sub>2</sub>		FeO		%	
		TiO <sub>2</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>
Роговая обманка	57,74	3,46	6,42	39,37	13,56	34,63	9,31	53,43							
Плагиоклаз	22,71	0,02	0,77	0,39	0,07	39,33	1,17	0,52							
Хлорит	10,63	0,42	3,24	16,34	1,64	11,43	4,93	22,23							
Ильменит	8,43	21,40	—	17,09	84,00	—	—	23,70							
Сумма	99,53				99,27	33,44	15,41	99,93							
Роговая обманка	33,49	5,00	3,84	40,43	26,59	76,73	—	65,00							
Плагиоклаз	6,42	0,01	0,21	0,10	0,05	16,93	—	0,16							
Ильменит	10,07	13,53	—	21,67	72,00	—	—	34,83							
Сумма	99,93				93,64	93,71	—	99,99							
Роговая обманка	56,69	1,40	6,00	61,19	5,60	33,53	—	73,13							
Плагиоклаз	31,85	0,03	1,03	0,54	0,12	54,23	—	0,60							
Сфен	5,23	9,34	0,13	0,44	37,33	—	—	0,49							
Ильменит	4,97	14,17	—	23,52	53,63	—	—	25,27							
Сумма	93,79				99,76	87,76	—	99,54							
Роговая обманка	45,93	2,24	4,35	55,13	12,65	25,24	10,63	66,42							
Плагиоклаз	49,72	0,04	1,69	0,34	0,21	73,93	3,70	1,01							
Сфен	4,43	16,03	0,15	0,37	86,77	—	0,32	0,44							
Ильменит	р.з.	—	—	—	—	—	—	—							
Сумма	99,93				99,63	99,20	14,65	67,37							

*Амфиболиты верхней подстилки терчинской свиты*

Актинолит	76,84	1,76	16,59	13,60	77,68	10,00	12,25	30,42	88,77	17,6	135,4	44,7	87,5	1,76	13,54	4,47	8,75
Плагиоклаз	47,01	0,01	43,97	0,57	0,23	0,05	32,47	1,27	0,32								
Сфен	5,64	15,40	—	0,19	0,47	83,95	—	0,42	0,53								
<b>Сумма</b>						99,00	44,72	32,11	59,62								
Актинолит	59,89	1,37	12,93	10,60	60,54	7,73	9,54	23,71	69,13								
Плагиоклаз	23,73	0,02	74,26	0,97	0,43	0,11	54,34	2,17	0,54	17,6	135,4	44,7	87,5	1,76	13,54	4,47	8,75
Сфен	10,86	17,09	—	0,38	0,91	92,00	—	0,85	1,04								
<b>Сумма</b>	99,43					99,59	64,33	26,73	70,76								
Актинолит	64,46	1,43	13,92	11,40	64,09	17,61	8,63	42,37	93,00								
Плагиоклаз	23,93	0,02	74,73	0,93	0,49	0,23	46,33	3,64	0,74	8,4	161,2	26,9	65,4	0,84	16,12	2,69	6,54
Сфен	6,23	6,88	—	0,21	0,52	82,00	—	0,73	0,79								
<b>Сумма</b>						99,84	55,01	46,79	99,53								
Актинолит	53,77	1,35	12,69	10,40	59,41	9,31	3,56	19,03	32,85								
Плагиоклаз	22,59	0,02	51,39	0,76	0,33	0,13	39,62	1,39	0,52	14,5	143,1	54,5	71,7	1,45	14,81	5,45	7,17
Сфен	18,02	13,05	—	0,63	1,51	90,00	—	1,15	2,10								
<b>Сумма</b>	99,33					99,44	43,13	21,62	35,47								

*Габбро*

Роговая обманка	73,50	4,41	66,00	7,79	53,95	55,12	33,13	24,04	99,00								
Плагиоклаз	26,50	0,02	63,50	0,90	0,45	0,25	34,33	2,77	0,2	8,0	199,2	32,4	54,5	0,8	19,92	3,24	5,45
Сфен	р.з.	—	—	—	—	—	—	—	—								
<b>Сумма</b>	100,00					55,37	67,51	26,81	99,82								

Т а б л и ц а 9 (окончание)

Минерал	Содержание минерала в породе, вес. %	Количество окислов в минерале, приходящихся на 1 г породы, мг				Процент окислов, приходящийся на данный минерал				Общее содержание окислов в породе							
		мг/г				%				мг/г				%			
		TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO
Роговая обманка	34,87	31,31	3,69	44,94	31,66	13,72	9,15	66,04									
Плагиоклаз	64,72	67,30	2,20	4,10	0,90	73,31	5,45	1,73	6,6	22,3,2	40,3	63,5	0,66	22,82	4,03	6,35	
Сфен	р.з.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	99,59				32,56	87,03	14,60	67,77									
Роговая обманка	59,37	3,56	53,31	6,29	50,14	27,07	13,24	97,00									
Плагиоклаз	39,16	0,03	102,57	1,34	0,67	52,09	2,82	1,29	5,7	196,9	47,5	51,7	0,57	19,69	4,75	5,17	
Сфен	0,43	1,73	—	0,01	0,03	30,35	0,02	0,05									
Сумма	99,48				93,32	79,16	16,08	98,34									

П р и м е ч а н и е. 1. Результаты расчетов распределения Nb, Ta и Th по минералам в коренных породах района приведены в тексте.

2. Прочерк означает либо отсутствие элемента (окисла) в минерале, либо невозможность его количественного учета при расчете баланса в случае присутствия минерала в редких зернах.

3. При расчетах были приняты следующие содержания элементов (окислов) в минералах:

Минерал	г, вес. %				г.10 <sup>-4</sup> , вес. %			
	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th	
Роговая обманка	0,60 (2)	8,98 (2)	1,06 (2)	12,03 (2)	2,2 (1)	0,5 (1)	10,0 (2)	
Актинолит	0,23 (5)	2,16 (5)	1,77 (5)	10,11 (5)		Нет данных		
Хлорит	0,40 (5)	20,31 (5)	3,04 (5)	22,43 (5)		»		
Биотит	2,17 (4)	18,67 (4)	2,09 (4)	18,12 (4)		»		
Сфен	40,43 (1)	— (1)	0,35 (1)	0,84 (1)		»		
Плагиоклаз	0,01 (7)	25,85 (25)	0,34 (25)	0,17 (14)		»	9,0 (2)	
Ильменит (теор. содер.)	52,66	—	—	47,34		Нет данных		

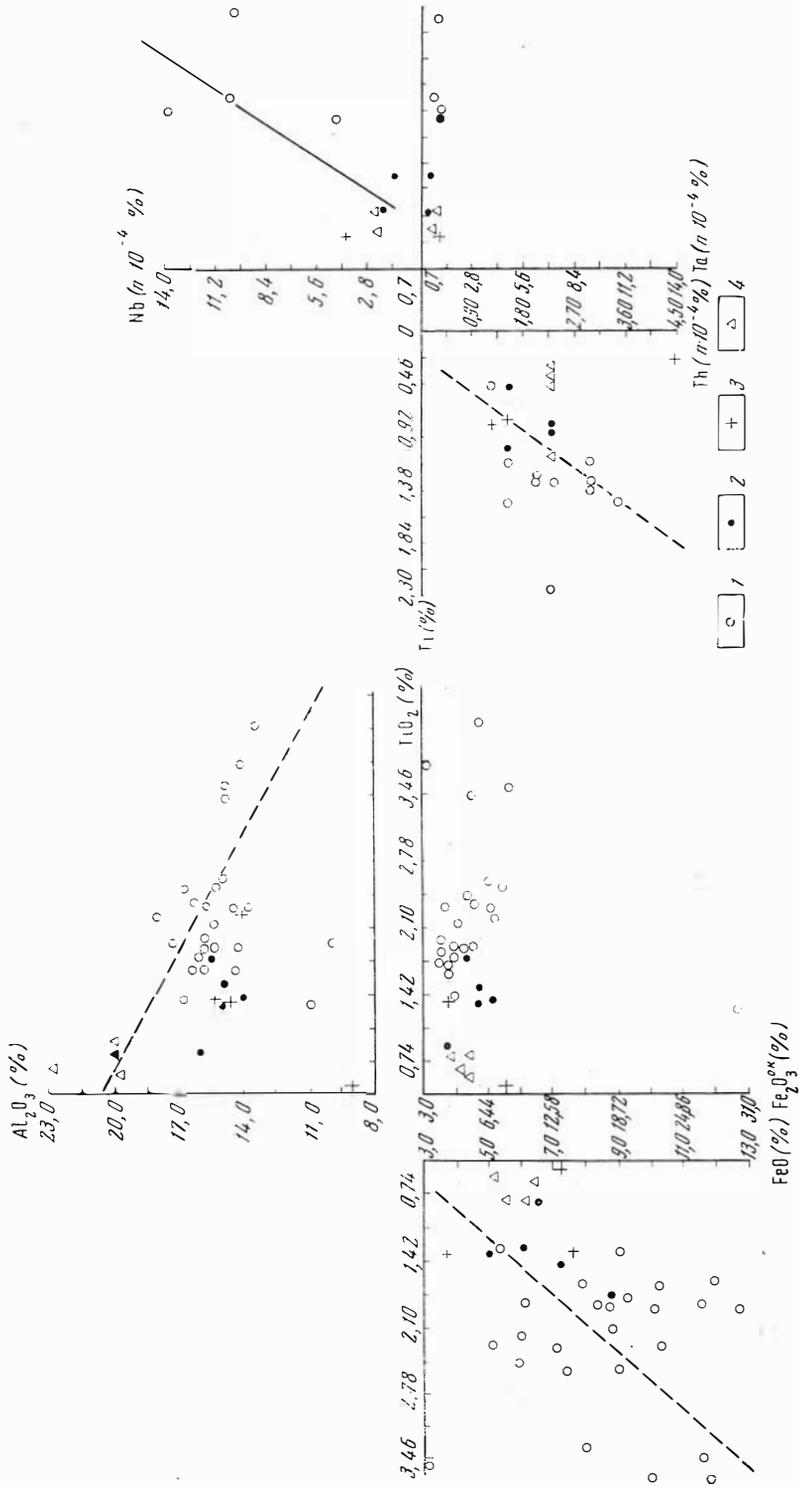


Рис. 15. Соотношения титана в коренных породах с алюминием, железом, ниобием, танталом, торием  
 1 — амфиболиты ( $P^{(tr)}$ ); 2 — амфиболиты ( $P^{(tr)}$ ); 3 — метаморфические сланцы (Sl); 4 — габбро (Сп)



## ПОВЕДЕНИЕ ТИТАНА В КОРЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ КОРЕННЫХ ПОРОД

### Гранулометрия материала коры выветривания и вещественный состав фракций, выделенных из этого материала

Для выяснения ряда вопросов в поведении титана и соотношениях его с другими элементами-гидролизатами, а также железом в процессе выветривания был выполнен полный гранулометрический анализ сорока одной пробы из коры выветривания. Эти пробы характеризуют различные зоны профиля выветривания, залегающего на разных породах домезозойского фундамента района (амфиболитах, известняках, сланцах, габбро). Результаты анализа нанесены на треугольную диаграмму (рис. 17). При ее построении были объединены частицы песчаной ( $>0,05$  мм) размерности (точка А), а также частицы крупно- и мелкопелитовой фракций ( $0,05-0,001$  мм; точка В). Точка С отвечает 100% содержанию в пробе глинистых частиц ( $<0,001$  мм). Полный перечень выделенных фракций и размеров частиц в них приведен в табл. 10. На диаграмме видно, что большинство исследованных проб сложены главным образом частицами песчаной и алевритовой размерности. Содержание глинистых частиц в пробах редко превышает 35—45%. Количественные соотношения между частицами разного размера в различных пробах изменяются и зависят от положения последних в профиле выветривания. Устанавливается, что максимальное количество (до 90%) частиц песчаной ( $>0,05$  мм) фракции содержится в пробах из нижних горизонтов выветривания. Вверх по разрезу коры выветривания в ее материале возрастает содержание как алевритовых (до 63%), так и глинистых (до 65%) фракций. Максимальные количества частиц этих фракций устанавливаются в пробах, отобранных из самых верхних горизонтов профиля выветривания. Таким образом, вверх по разрезу коры вы-

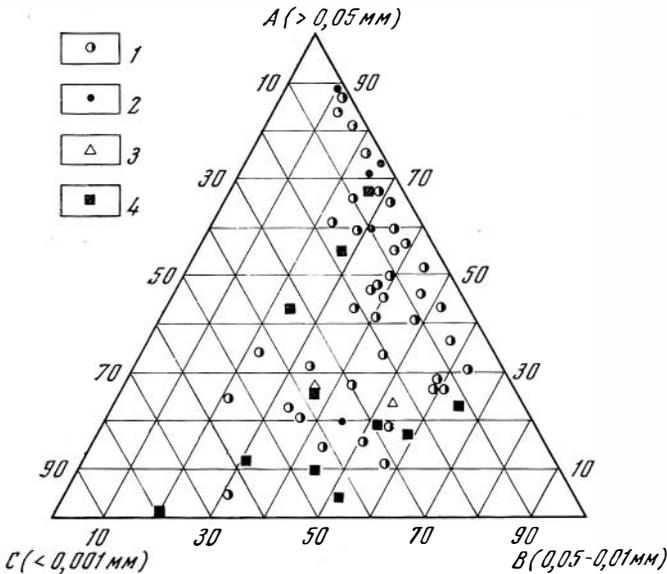


Рис. 17. Гранулометрический состав материала коры выветривания, бокситов, огнеупорных и пестроцветных глин

Пробы из: 1 — коры выветривания; 2 — бокситов; 3 — огнеупорных глин; 4 — пестроцветных глин

**Количественно-минералогический состав фракции из**

Зоны выветривания	Число изученных проб	Фракция > 2,0 мм		
		Состав фракции	Содержание во фракции (%)	
			пределы колебаний	среднее
<i>Кора выветривания на</i>				
Нижние горизонты, представленные слабо выветрелыми коренными породами (амфиболитами)	9	1. Слабо выветрелые обломки амфиболитов	70—95	85
		2. Лимонит	5—25	14
		3. Слабо выветрелый полевой шпат	3—5	1
		4. Кварц	(-) — (+)	+
Средние и верхние горизонты, представленные глинами, иногда со свободными гидроокислами алюминия	20	То же	5—100	70
			(-) — 95	25
			(-) — 5	3
			(-) — 3	+
<i>Кора выветривания на</i>				
Переотложенные главным образом средние и верхние горизонты коры выветривания на амфиболитах	20	1. Выветрелые обломки амфиболитов	10—90	50
		2. Лимонит	(+) — 80	20
		3. Кварц	(+) — 80	25
		4. Выветрелый полевой шпат	(+) — 10	4
		5. Графит	(+) — 3	1
<i>Кора выветривания на</i>				
Нижние и средние горизонты, представленные слабо выветрелыми коренными породами и глинами	7	1. Обломки сланцев, выветрелые в разной степени	20—95	85
		2. Лимонит	1—20	10
		3. Кварц	(+) — 5	3
<i>Кора выветривания</i>				
Нижние горизонты, сложенные слабо выветрелыми коренными породами	5	1. Слабо выветрелые обломки габбро	60—90	85
		2. Лимонит	10—20	15

ветривания величина зерна слагающего ее материала уменьшается, что хорошо согласуется с общей направленностью процесса дезинтеграции материнских пород при выветривании [45, 46].

Количественно-минералогический состав фракций, выделенных из материала коры выветривания, залегающей на разных по составу породах фундамента, приведен в табл. 10. Данные таблицы свидетельствуют о различии количественно-минералогического состава в разных фракциях. Эти различия обусловлены составом исходных пород и местоположением отобранных проб в разрезе коры выветривания. Крупнозерни-

## материала коры выветривания на изученных участках

Фракция 2,0—1,0 мм			Фракция 1,0—0,5 мм		
Состав фракции	Содержание во фракции (%)		Состав фракции	Содержание во фракции (%)	
	пределы колебаний	среднее		пределы колебаний	среднее
<i>амфиболитах терсинской свиты</i>					
Тот же, что и во фр. >2,0 мм	70—95	85	Тот же, что и во фр. >2,0мм	20—70	50
	3—10	7		5—25	15
	5—15	8		10—50	35
Тот же, что и во фр. >2,0 мм	(—) — (+)	+	1. Сильно выветрелые обломки амфиболитов 2. Лимонит 3. Сильно выветрелый пол. шпат 4. Ильменит 5. Кварц	(+) — 1,0	+
	20—95	70		10—30	65
	(—) — 85	25		(+) — 65	20
	(—) — 8	5		(+) — 30	15
	(—) — 3	+		(—) — (+)	+
			(—) — 1	+	
<i>известняках</i>					
Тот же, что и во фр. >2,0 мм	5—90	60	Тот же, что и во фр. >2,0мм	10—70	40
	(+) — 80	15		5—60	20
	(+) — 75	15		1—30	15
	1—15	8		(+) — 30	15
	(+) — 7	3		(+) — 15	7
<i>метаморфических сланцах</i>					
Тот же, что и во фр. >2,0 мм	20—95	80	1. Обломки сланцев, выветрелые в разной степени 2. Лимонит 3. Кварц 4. Выветрелый полевой шпат	15—90	70
	1—25	15		1—20	12
	(+) — 10	5		(+) — 10	3
				1—30	15
<i>на габбро</i>					
Тот же, что и во фр. >2,0 мм	65—90	80	Тот же, что и во фр. >2,0мм	40—85	60
	10—30	20		20—60	40

стые (>2,0 мм; 2,0—1,0 мм; 1,0—0,5 мм) фракции коры выветривания на различных породах фундамента сложены главным образом (до 95%) обломками исходных материнских пород и в меньшей мере — лимонитом, полевыми шпатами, кварцем. Степень выветрелости этого материала заметно возрастает вверх по разрезу. Для крупнозернистых фракций из переотложенной коры выветривания, залегающей на известняках, характерно повышенное содержание кварца (до 80%) и графита (до 15%), непременно присутствующих в составе подстилающих мраморизованных известняков. Наличие выветрелых обломков амфиболитов

Зоны выветривания	Число изученных проб	Фракция 0,5—0,25 мм		
		Состав фракции	Содержание во фракции (%)	
			пределы колебаний	среднее
<i>Кора выветривания на</i>				
Нижние горизонты, представленные слабо выветрелыми коренными породами (амфиболитами)	9	1. Полевой шпат	50—95	80
		2. Лимонит	5—10	6
		3. Амфибол	5—15	13
		4. Ильменит	(+) — 0,5	+
		5. Сфен	(+) — 3	1
		6. Магнетит	(+) — (+)	+
		7. Кварц	(+) — 3,0	+
Средние и верхние горизонты, представленные глинами, иногда со свободными гидроокислами алюминия	20	1. Сильно выветрелые обломки амфиболита	5—80	60
		2. Лимонит	1—20	10
		3. Выветрелый полевой шпат	1—40	20
		4. Выветрелый амфибол	(-) — 10	5
		5. Ильменит	(-) — 10	3
		6. Кварц	(-) — 20	1
		7. Графит	(-) — (+)	+
		8. Хлорит, биотит	(-) — 3	1
<i>Кора выветривания на</i>				
Переотложенные главным образом средние и верхние горизонты коры выветривания на амфиболитах	20	1. Выветрелые обломки амфиболитов	5—50	25
		2. Лимонит	1—30	15
		3. Кварц	1—30	15
		4. Выветрелый полевой шпат	10—60	30
		5. Хлорит, биотит	(+) — 20	10
		6. Ильменит	(-) — 2	0,5
		7. Сфен	(-) — (+)	+
		8. Рутил	(-) — (+)	+
		9. Графит	(+) — 6	3
<i>Кора выветривания на</i>				
Нижние и средние горизонты, представленные слабо выветрелыми коренными породами и глинами	7	Тот же, что и во фр. 1,0—0,5 мм + ильменит		60
		Ильменит	(-) — (+)	15 3 20 +
<i>Кора выветривания</i>				
Нижние горизонты, сложенные слабо выветрелыми коренными породами	5	1. Слабо выветрелые обломки	10—70	40
		2. Лимонит	5—50	30
		3. Хлорит	(+) — 5	3
		4. Кварц	(-) — 3	1
		5. Полевой шпат	5—30	20

Т а б л и ц а 10 (продолжение)

Фракция 0,25—0,10 мм			Фракция 0,10—0,05 мм		
Состав фракции	Содержание во фракции (%)		Состав фракции	Содержание во фракции (%)	
	пределы колебаний	среднее		пределы колебаний	среднее
<i>амфиболитах терсинской свиты</i>					
1. Полевой шпат	60—80	75	1. Полевой шпат	50—90	75
2. Лимонит	5—20	10	2. Лимонит	1—10	6
3. Амфибол	5—20	10	3. Амфибол	5—20	10
4. Ильменит	1—3	2	4. Ильменит	1—5	3
5. Сфен	1—5	3	5. Сфен	(+) — (+)	+
6. Кварц	(+) — (+)	+	6. Апатит	1—5	3
7. Хлорит, биотит	(+) — 3	1	7. Гидрослюда	1—5	3
			8. Циркон	(+) — (+)	+
			9. Рутил	(-) — (+)	+
1. Выветрелый полевой шпат	5—70	55	1. Выветрелый полевой шпат	20—90	75
2. Выветрелые обломки амфиболита	5—40	20	2. Лимонит	1—10	5
3. Лимонит	1—10	5	3. Ильменит	1—25	6
4. Гидрослюда	(-) — 40	3	4. Сфен	(-) — (+)	+
5. Ильменит	0,3—45	10	5. Рутил	(-) — 5	3
6. Сфен	(-) — (+)	+	6. Апатит	(-) — 5	3
7. Рутил	(-) — (+)	+	7. Циркон	(-) — (+)	+
8. Кварц	(-) — 1	+	8. Гидрослюда	(-) — 70	14
9. Графит	(-) — (+)	+	9. Каолинит	(-) — 3	1
10. Апатит	(-) — 1	+	10. Хлорит, биотит	(+) — 1	+
11. Хлорит, биотит	(+) — 10	7			
<i>известняках</i>					
1. Тот же, что и во фр. 0,50—0,25 мм	1—30	10	1. Выветрелые обломки амфиболитов	1—30	22
Сфен отсутствует	0,5—20	5	2. Полевой шпат	10—80	60
	1—20	10	3. Хлорит, биотит	0,5—20	10
	10—70	45	4. Кварц	1—10	5
	1—40	20	5. Ильменит	1—5	3
	(+) — 20	8	6. Рутил	(-) — (+)	+
	(-) — (+)	+	7. Апатит	(-) — (+)	+
	(+) — 5	2	8. Циркон	(-) — (+)	+
			9. Турмалин	(-) — (+)	+
			10. Каолинит	(-) — 5	1
<i>метаморфических сланцах</i>					
1. Выветрелые обломки сланцев	10—60	45	1. Выветрелые обломки сланцев	1—25	20
2. Лимонит	1—30	15	2. Лимонит	1—20	10
3. Выветрелый полевой шпат	10—50	30	3. Выветрелый полевой шпат	20—80	60
4. Кварц	(+) — 10	5	4. Кварц	(+) — 7	3
5. Хлорит	(+) — 5	3	5. Хлорит	1—20	7
6. Ильменит	(-) — (+)	+	6. Ильменит	(+) — 2	0,15
			7. Сфен	(-) — (+)	+
			8. Гидрослюда	(-) — 3	1
			9. Каолинит	(-) — 5	3
			10. Циркон	(-) — (+)	+
<i>на габбро</i>					
Тот же, что и во фр. 0,50—0,25 мм + ильменит	10—50	33	1. Слабо выветрелые обломки габбро	10—40	20
	1—30	15	2. Полевой шпат	20—80	50
	1—10	5	3. Лимонит	1—20	10
	1—5	3	4. Хлорит	1—20	10
	20—60	40	5. Ильменит	(+) — 0,5	0,05
Ильменит	(-) — 0,3	0,05	6. Сфен	(-) — (+)	+
			7. Монтмориллонит	(-) — 15	10

Зоны выветривания	Число изученных проб	Фракция 0,05—0,01 мм		
		Состав фракции	Содержание во фракции (%)	
			пределы колебаний	среднее
<i>Кора выветривания на</i>				
Нижние горизонты, представленные слабо выветрелыми коренными породами (амфиболитами)	9	1. Полевой шпат	70—90	80
		2. Лимонит	(+) — 3	1
		3. Амфибол	1—5	2
		4. Ильменит	1—3	2
		5. Монтмориллонит	5—22	15
		6. Апатит	(+) — (+)	+
		7. Циркон	(+) — (+)	+
		8. Рутил	(-) — (+)	+
Средние и верхние горизонты, представленные глинами, иногда со свободными гидроксидами алюминия	20	1. Выветрелый полевой шпат	20—90	60
		2. Гидрослюда	10—40	20
		3. Каолинит	1—30	14
		4. Ильменит	(+) — 10	3,2
		5. Рутил	(-) — (+)	+
		6. Апатит	(-) — (+)	+
		7. Циркон	(-) — (+)	+
		8. Лимонит	(-) — 5	3
<i>Кора выветривания на</i>				
Переотложенные главным образом средние и верхние горизонты коры выветривания на амфиболитах	20	1. Выветрелый полевой шпат	5—60	52
		2. Кварц	1—30	15
		3. Ильменит	1—20	5
		4. Рутил	(-) — (+)	+
		5. Апатит	(-) — (+)	+
		6. Циркон	(-) — (+)	+
		7. Каолинит	5—40	27
<i>Кора выветривания на</i>				
Нижние и средние горизонты, представленные слабо выветрелыми породами и глинами	7	Тот же, что и во фр. 0,10—0,05 мм	(+) — 15	10
			1—20	10
			10—70	65
			(+) — 5	1
			(-) — (+)	+
			(+) — 5	3
			(-) — (+)	+
			(-) — (+)	1
1—20	10			
(-) — (+)	+			
<i>Кора выветривания</i>				
Нижние горизонты, сложенные слабо выветрелыми коренными породами	5	Тот же, что и во фр. 0,10—0,05 мм	1—25	17
			20—70	50
			1—5	3
			0,5—15	5
			(+) — 0,5	0,03
			(-) — (+)	+
5—40	30			

Примечание. Минус означает, что минерал отсутствует, плюс—минерал в редких зернах.

Таблица 10 (окончание)

Фракция 0,01—0,001 мм			Фракция <0,001 мм		
Состав фракции	Содержание во фракции (%)		Состав фракции	Содержание во фракции (%)	
	пределы колебаний	среднее		пределы колебаний	среднее

*амфиболитах терсинской свиты*

1. Полевой шпат	10—30	20	1. Монтмориллонит	70—95	85
2. Монтмориллонит	50—90	60	2. Гидрослюда	5—20	10
3. Гидрослюда	5—20	15	3. Каолинит	5—10	5
4. Каолинит	1—10	5			
5. Ильменит	(—) — 0,9	0,7			
1. Выветрелый полевой шпат	1—20	10	1. Каолинит	60—95	85
2. Каолинит	20—90	70	2. Гидрослюда	5—20	10
3. Гидрослюда	1—30	20	3. Монтмориллонит	1—10	5
4. Монтмориллонит	(—) — 1	<1	4. Гидраргиллит	(—) — 1	<1
5. Ильменит	(—) — 0,7	0,5			

*известняках*

1. Выветрелый полевой шпат	1—40	25	1. Каолинит	40—95	80
2. Кварц	(+) — 10	5	2. Гидрослюда	1—30	15
3. Ильменит	(+) — 3	1	3. Монтмориллонит	0,5—10	5
4. Каолинит	20—80	60	4. Гидраргиллит	(—) — 1	<1
5. Рутил	(—) — (+)	+			
6. Циркон	(—) — (+)	+			

*метаморфических сланцах*

1. Выветрелый полевой шпат	1—40	25	1. Каолинит	50—95	90
2. Кварц	(+) — 5	3	2. Гидрослюда	1—15	7
3. Каолинит	20—80	64	3. Монтмориллонит	(—) — 5	3
4. Гидрослюда	1—10	5			
5. Ильменит	(+) — 1,0	0,4			
6. Рутил	(—) — (+)	+			
7. Монтмориллонит	(—) — 1	<1			

*на габбро*

1. Полевой шпат	20—80	55	1. Монтмориллонит	50—25	80
2. Лимонит	1—10	5	2. Каолинит	5—45	20
3. Хлорит	1—10	4			
4. Ильменит	(+) — 0,5	0,02			
5. Монтмориллонит	5—50	33			
6. Каолинит	1—5	3			

в коре выветривания на известняках служит одним из доказательств переотложенного характера последней. Фракции песчаной (0,50—0,25 мм; 0,25—0,10 мм; 0,10—0,05 мм) и крупноалевритовой (0,05—0,01 мм) размерности во всех изученных пробах являются наиболее полиминеральными. С уменьшением размера зерен слагающих минеральных компонентов для состава этих фракций характерно падение содержания обломков материнских пород (до 3%); возрастание количества полевых шпатов (до 90%), наиболее выветрелых в верхних горизонтах профиля выветривания; увеличение содержания титановых минералов (до 25%); появление глинистых минералов (монтмориллонита, гидрослюда, каолинита) и иногда в значительных количествах (до 20%). Мелкоалевролитовые фракции сложены главным образом (до 60—90%) глинистыми минералами; в незначительном количестве в них присутствуют выветрелый полевой шпат, кварц, циркон, титановые минералы (ильменит, рутил). Глинистые фракции (<0,001 мм) содержат только минералы глин: каолин, гидрослуду, монтмориллонит. В отдельных пробах, отобранных из верхних горизонтов коры выветривания на амфиболитах и известняках, в их глинистых фракциях термическим и рентгеноструктурным анализами устанавливается гидраргиллит (до 1%). Совместно с данными химических анализов (табл. 3, глава IV) это обстоятельство также служит подтверждением латеритного характера выветривания в исследуемом районе. Состав глинистых минералов из нижних горизонтов коры выветривания тесно связан с составом материнских пород. Так, на основных породах (метаморфических — амфиболитах и интрузивных — габбро) в нижних частях профиля выветривания самым распространенным глинистым минералом является монтмориллонит. В верхних горизонтах выветривания вне зависимости от состава подстилающих пород среди минералов глин существенно преобладает каолинит. Подобные факты достаточно обстоятельно обсуждены в литературе [45, 46, 108].

Минералы титана в коре выветривания, залегающей на различных породах фундамента в районе, представлены ильменитом, рутилом, сфеном. Самым распространенным из них является ильменит. Титаномагнетит, присутствующий в материнских породах, представляет неустойчивый минеральный агрегат и при выветривании не сохраняется [39, 72, 120]. Минералы титана концентрируются в определенных фракциях продуктов выветривания, размер частиц в которых соответствует наиболее распространенной величине зерна (0,04—0,10 мм) титановых минералов в материнских породах. До 70—90% ильменита, рутила и сфена сосредоточено во фракциях 0,25—0,10; 0,10—0,05 и 0,05—0,01 мм (табл. 10). Ниже характеризуются титановые минералы, содержащиеся в продуктах выветривания района.

*Ильменит*, как отмечалось, является самым распространенным минералом титана в коре выветривания. Абсолютные содержания этого минерала изменяются в очень широких пределах: от нескольких до 200—300 кг/м<sup>3</sup>. Ильменит представлен главным образом мелкими неправильными зернами черного цвета. Редко более крупные (0,25 мм) выделения этого минерала имеют таблитчатый гексагональный габитус. По оптическим свойствам ильменит из коры выветривания отличается от такового из материнских пород. Эти отличия состоят в том, что ильменит из продуктов выветривания имеет плохо различимый светло-коричневый оттенок, слабо выраженное двуотражение без заметных цветных эффектов, а при скрещенных николях характеризуется неясно проявленной анизотропией. Ильменит, имеющий в отраженном свете одинаковые оптические характеристики с ильменитом из коренных пород, представлен в коре выветривания лишь редкими и единичными зернами, которые появляются только в непосредственной близости от материнских пород.

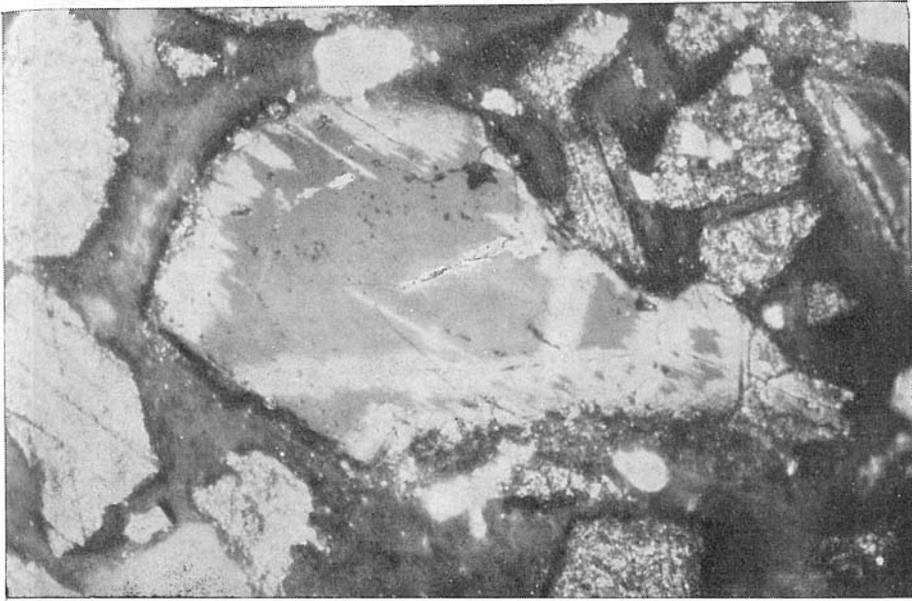


Рис. 18. Лейкоксенизированный ильменит. Развитие лейкоксена (белое) по ильмениту (серое): увел. 450, николи скрещены, иммерсия

Отмеченные особенности ильменита из коры выветривания связаны, по-видимому, с самыми начальными стадиями его изменения в условиях выветривания [120]. Подобные указания имеются также в литературе [126, 133]. Процессу лейкоксенизации ильменит подвержен очень слабо. Лишь в самых верхних горизонтах коры выветривания устанавливаются зерна лейкоксенизированного ильменита, имеющие серовато-черный или темно-коричневый цвет, полуметаллический и матовый блеск и зернистый излом. Лейкоксен обычно замещает ильменит по периферии его зерен к центру, особенно интенсивно развиваясь по трещинам и направлениям спайности (рис. 18). Граница развития лейкоксена по ильмениту неправильная. Иногда в пределах зерен ильменита лейкоксен образует петельчатые структуры замещения или прожилкообразные, неправильной формы выделения. Подобные формы развития лейкоксена были установлены Е. Ф. Зив [43] при изучении процессов изменения ильменита в коре выветривания на одном из месторождений Вольнии. Это позволило ей сделать заключение о метасоматическом характере лейкоксенизации ильменита в гипергенных условиях.

Для подтверждения результатов минераграфических исследований был выполнен химический анализ мономинеральной ильменитовой фракции из коры выветривания амфиболитов [120]. Анализом обнаружены (в %):  $TiO_2 = 54,19$ ;  $Fe_2O_3^{ок} = 16,40$ ;  $FeO = 31,69$ ;  $Cr_2O_3 = 0,03$ ;  $\Sigma = 102,31$ . Устанавливается, что в анализируемом ильмените содержание  $TiO_2$  равно 54,19%. Оно немного выше теоретического содержания  $TiO_2$  (52,66%) в этом минерале. Кроме того, суммарное содержание  $FeO$  (31,69%) и  $Fe_2O_3^{ок}$  (16,40%) в анализируемом образце соответствует теоретическому содержанию  $FeO$  (47,34%) в ильмените. Этот факт свидетельствует о том, что в анализируемом образце ильменита из коры выветривания происходит окисление части закисного железа в окисное. Подобное обстоятельство отмечали А. Ф. Ли, О. Т. Гребенникова и Н. С. Ясус [52] для некоторых слабо лейкоксенизированных ильменитов. Для оценки степени изменения ильменита по предложению

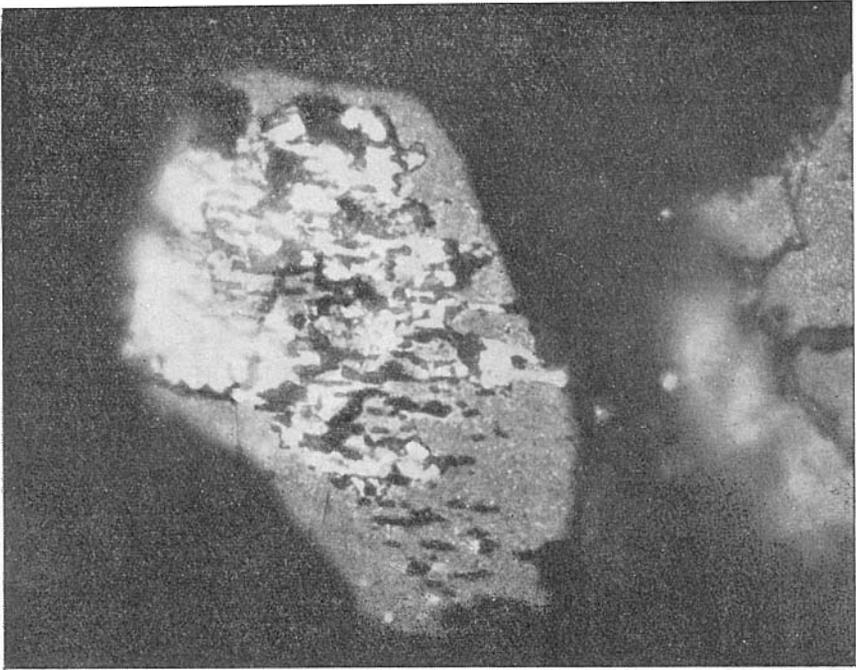


Рис. 19. Развитие рутила (белое) по лейкоксену (серое); увел. 500, николи скрещены, иммерсия

А. Н. Жердевой [39] были вычислены два отношения, имеющегося в образце окисного железа к общему содержанию железа ( $Fe^{3+}/Fe_{общ.}$ ; степень окисления) и содержания железа к содержанию окиси титана ( $Fe_{общ.}/TiO_2$ ; степень выщелачивания ильменита). Для анализируемого образца эти отношения оказались равными:  $Fe_{общ.}/TiO_2=0,66$  и  $Fe^{3+}/Fe_{общ.}=0,31$ , что соответствует, согласно данным А. Н. Жердевой, слабо измененному ильмениту. Таким образом, химический анализ подтверждает результаты минераграфических исследований ильменита.

*Рутил* в коре выветривания присутствует в двух разновидностях. 1. Рутил, который образует мелкие (0,02—0,07 мм) удлиненные кристаллики красного цвета, на гранях которых иногда заметна грубая штриховка. Такая разновидность этого минерала очень похожа на рутил, содержащийся в амфиболитах (глава V), и ее следует считать терригенной, заимствованной из коренных пород. 2. Рутил, который присутствует в более крупных (0,15—0,30 мм) неправильных зернах темнокрасного цвета. Кристаллографические грани и штриховка на поверхности таких зерен рутила отсутствуют. В отраженном свете устанавливается, что темно-красный рутил развивается по лейкоксену, замещающему ильменит (рис. 19), являясь таким образом конечным аутигенным продуктом изменения ильменита в гипергенных условиях [120]. По количеству темно-красная разновидность рутила в 3—5 раз уступает светло-красной разновидности. Абсолютные содержания рутила в коре выветривания так же, как ильменита, изменяются в очень широких пределах: от редких зерен до 30 кг/м<sup>3</sup>.

*Сфен* в коре выветривания присутствует в незначительном количестве (до 0,5—1,0 кг/м<sup>3</sup>) и главным образом в ее нижних и реже средних горизонтах, залегающих на амфиболитах верхней подсвиты терсинской свиты, которые содержат повышенные количества этого минерала (глава V). По форме зерен и кристаллов, их размеру и цвету сфен из коры

выветривания полностью соответствует таковому из коренных пород. В верхних горизонтах профиля выветривания сфен практически отсутствует, являясь малоустойчивым при выветривании минералом титана [39, 72].

Таким образом, в пределах изученных участков нижнемеловая кора выветривания, залегающая на докембрийских породах фундамента, сложена главным образом материалом песчаной и алевритовой размерности. Вверх по разрезу выветривания дезинтеграция материала возрастает с увеличением в нем содержания алевритовых и глинистых фракций. Количественно-минералогический состав выделенных фракций определяется составом коренных пород и местоположением исследованных проб в профиле выветривания. Минералы титана (ильменит, рутил, сфен) концентрируются в тех фракциях продуктов выветривания, размер частиц в которых соответствует наиболее распространенной величине зерна титановых минералов в материнских породах. Ильменит является самым распространенным минералом титана в коре выветривания.

Минераграфическими и химическими исследованиями устанавливается незначительное изменение этого минерала в профиле выветривания, лишь несколько возрастающее в самых верхних его горизонтах.

### Распределение Ti, Al, Nb, Ta, Th и Fe в коре выветривания

Содержания указанных элементов и их соотношения в профиле выветривания района приведены в табл. 11, 12 и показаны на рис. 20. Анализируя эти данные, отметим следующее.

Содержание  $TiO_2$  в коре выветривания на разных по составу коренных породах различно. Наиболее высокие содержания  $TiO_2$  (до 19%; по Л. Г. Кочурову, 1963 г.) устанавливаются в коре выветривания амфиболитов терсинской свиты, содержащих повышенное в сравнении с другими материнскими породами количество титана (глава V). Наименьшие количества двуокиси титана (до 1%) обнаруживаются в коре выветривания габбро, характеризующихся очень низкими содержаниями  $TiO_2$  (см. глава V). По изученным пробам средние содержания  $TiO_2$  в коре выветривания на амфиболитах, известняках, сланцах и габбро составляют соответственно 3,32, 3,03, 2,38 и 0,83%. В профилях выветривания на разных породах наиболее высокие концентрации  $TiO_2$  устанавливаются преимущественно в верхних переотложенных горизонтах. Характер распределения  $TiO_2$  в коре выветривания в значительной мере определяется распределением этого элемента в коренных породах. Так, наиболее равномерно двуокись титана распределена в коре выветривания габбро, характеризующихся также равномерным распределением этого элемента. Самые значительные колебания  $TiO_2$  в изученных пробах (0,76—7,39%) устанавливаются в профиле выветривания амфиболитов, в которых титан распределен весьма неравномерно в сравнении с другими коренными породами. Величина коэффициента вариации, характеризующая изменение содержания  $TiO_2$  в профилях выветривания на разных породах, изменяется следующим образом: на амфиболитах — 52,0; на известняках — 51,0; на метаморфических сланцах — 33,0; на габбро — 9,0 (табл. 13). Таким образом, наибольшее значение коэффициента вариации, соответствующее наиболее неравномерному распределению  $TiO_2$ , устанавливается для коры выветривания амфиболитов терсинской свиты. В горизонтах ожелезнения (бурых железняках) и сидеритизации, распространенных в коре выветривания районах и генетически связанных со вторичными наложенными процессами, содержания  $TiO_2$ , как правило, невысокие, они в 1,5—3,0 раза ниже средних содержаний этого окисла

Содержания Si, Ti, Al, Nb, Ta, Th и Fe в коре выветривания,

Кора выветривания	л. вес. %					
	SiO <sub>2</sub>		TiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее
	<i>Кора выветривания</i>					
Непереотложенная	45,99—48,74	47,51 (3)	0,76—1,63	1,20 (3)	17,46—19,72	18,48 (3)
Переотложенная	26,34—49,62	35,56 (17)	2,23—7,39	4,11 (17)	13,36—33,10	27,32 (17)
Среднее		37,37 (20)		3,32 (20)		24,78 (20)
	<i>Кора выветривания</i>					
Переотложенная	30,80—60,58	39,82 (25)	1,17—6,37	3,03 (25)	15,07—33,01	23,61 (25)
	<i>Кора выветривания на</i>					
Частично переотложенная	32,43—51,59	39,97 (7)	0,70—3,65	2,38 (7)	15,62—29,44	24,02 (7)
	<i>Кора выветривания</i>					
Непереотложенная	42,73—44,15	43,44 (5)	0,73—0,89	0,83 (5)	24,01—26,67	25,34 (5)
	<i>Горизонты</i>					
	19,90—37,10	36,08 (7)	1,18—3,07	1,86 (7)	17,61—25,46	20,58 (7)
	<i>Буры</i>					
	9,63—32,11	23,18 (6)	0,25—2,72	1,03 (6)	2,89—21,63	9,87 (6)

Примечание. Горизонты сидеритизации и бурые железняки являются вторичными образованиями в

в продуктах выветривания коренных пород. Подобные факты широко известны в литературе [14, 55, 58, 59, 116].

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в коре выветривания в сравнении с TiO<sub>2</sub> распределен более равномерно. Средние содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в коре выветривания на амфиболитах, известняках, сланцах и габбро различаются незначительно и равны соответственно: 24,78; 23,61; 24,02 и 25,34%. Величины коэффициентов вариации для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в коре выветривания на тех же породах составляют, соответственно, 26,0; 22,0; 21,0 и 7,0 (табл. 13). Как и TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> распределена наиболее равномерно (величина коэффициента вариации минимальна — 7,0) в коре выветривания габбро, где алюминий распределен также равномерно (см. гл. V). Более высокие значения коэффициента вариации и менее равномерное распределение для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> устанавливаются в коре выветривания амфиболитов, характеризующихся неравномерным распределением этого элемента. Наиболее высокие концентрации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, как и TiO<sub>2</sub>, устанавливаются в верхних переотложенных горизонтах, где содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> достигает 27,32% по сравнению с 18,48% в нижних

Таблица 11

## горизонтах сидеритизации и бурых железняках района

л, вес. %				л·10 <sup>-4</sup> , вес. %					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>		FeO		Nb		Ta		Th	
пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее
<i>на амфиболитах</i>									
9,93—12,66	11,17 (4)	0,44—2,21	1,63 (3)	2,50—6,50	4,50 (2)	0,73—0,80	0,79 (2)	3,0	3,0 (1)
3,54—24,74	15,07 (17)	0,23—5,27	1,95 (14)	0,00—41,2	20,6 (20)	1,60—1,63	1,61 (2)	2,5—5,0	3,75 (2)
	14,32 (21)		1,88 (17)		16,73 (4)		1,20 (4)		3,50 (3)
<i>на известняках</i>									
7,50—20,13	14,42 (25)	0,21—6,66	1,33 (25)	Сл.—34,2	17,90 (3)	0,73—1,20	1,04 (3)	1,5—3,0	2,25 (2)
<i>метаморфических сланцах</i>									
13,90—24,28	19,40 (9)	0,14—2,65	1,46 (7)	1,60—21,60	9,06 (3)	0,73—2,30	1,32 (3)	2,3—4,0	3,15 (3)
<i>на габбро</i>									
12,94—17,33	15,13 (5)	0,14—0,30	0,20 (5)	0,52—4,30	2,40 (2)	1,30—1,60	1,45 (2)	2,0—11,0	6,50 (2)
<i>сидеритизации</i>									
4,92—10,17	5,34 (7)	10,75—24,17	14,12 (7)	—	—	—	—	—	—
<i>железняки</i>									
23,17—72,97	56,16 (6)	0,14—1,24	0,44 (6)	3,50—48,9	16,17 (5)	0,78—1,50	0,96 (5)	3,0—3,0	3,0 (2)

коре выветривания.

непереотложенных горизонтах. В горизонтах сидеритизации содержания  $Al_2O_3$  несколько ниже (от 17,61 до 25,46%), чем среднее содержание в продуктах выветривания в коренных породах (25,0%). В бурых железняках количество  $Al_2O_3$  не превышает 10,0% (в среднем 9,87%), что в 2,0—2,5 раза ниже средних содержаний этого окисла в коре выветривания. Таким образом, распределение  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  в изученных профилях выветривания на разных коренных породах во многих отношениях является сходным.

В распределении окисного ( $Fe_2O_3^{ок}$ ) и закисного ( $FeO$ ) железа устанавливаются существенные различия. В общем в изученных профилях выветривания  $Fe_2O_3^{ок}$  распределен так же, как  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$ . Величина коэффициентов вариации для  $Fe_2O_3^{ок}$  близка к такой же для  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  (для  $Fe_2O_3^{ок}$  в коре выветривания на амфиболитах 44,0; на известняках—34,0; на сланцах—27,0; на габбро—20,0; табл. 13). Самые высокие содержания  $Fe_2O_3^{ок}$  устанавливаются в верхних переотложенных горизонтах профиля выветривания. В горизонтах сидеритизации содержание

Значения отношений  $Al_2O_3/SiO_2$ ,  $TiO_2/Al_2O_3$ ,  $TiO_2/Fe_2O_3^{OK}$ ,  $TiO_2/FeO$ ,  $Ti/Nb$ ,  $Ti/Ta$  и  $Ti/Th$

Объекты исследований	п					
	$Al_2O_3/SiO_2$		$TiO_2/Al_2O_3$		$TiO_2/Fe_2O_3^{OK}$	
	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее
Кора выветривания:						
на амфиболитах	0,41—1,00	0,65 (20)	0,03—0,25	0,12 (20)	0,07—1,17	0,31 (20)
на известняках	0,27—0,89	0,63 (25)	0,06—0,20	0,12 (25)	0,03—0,62	0,22 (25)
на метаморфических сланцах	0,30—0,83	0,65 (7)	0,04—0,12	0,08 (7)	0,03—0,26	0,13 (7)
на габбро	0,56—0,60	0,58 (5)	0,03—0,03	0,03 (5)	0,05—0,06	0,05 (5)
Горизонты сидеритизации	0,45—0,88	0,63 (7)	0,06—0,17	0,09 (7)	0,11—0,62	0,45 (7)
Бурые железняки	0,24—0,73	0,45 (6)	0,04—0,22	0,10 (6)	0,003—0,16	0,04 (6)

$Fe_2O_3^{OK}$  (среднее 5,34%) в 2—3 раза ниже средних его содержаний в продуктах выветривания, тогда как в бурых железняках содержание окисного железа повышается в 4—6 раз по сравнению с содержанием этого элемента в различных профилях выветривания. Для  $FeO$  характерно весьма неравномерное распределение во всех изученных профилях выветривания, о чем убедительно свидетельствуют высокие значения коэффициентов вариации (в коре выветривания на амфиболитах — 127,0; на известняках — 79,0; на сланцах — 76,0; на габбро — 40,0; табл. 13). В горизонтах сидеритизации содержание  $FeO$  в 8—10 раз выше, чем в продуктах выветривания, а в бурых железняках по сравнению с тем же выветрелым материалом содержание этого элемента уменьшается в 3—5 раз.

В распределении  $Nb$  и  $Ta$  также устанавливаются различия во всех изученных профилях выветривания.  $Nb$  распределен неравномерно, что подтверждается высокими значениями коэффициентов вариации для содержаний этого элемента (в коре выветривания на амфиболитах — 127,0; на известняках — 141,0; на сланцах — 121,0; на габбро — 112,0; табл. 13). Различия в самых низких и высоких содержаниях  $Nb$  в исследованных пробах достигают иногда 20-кратной величины. Для  $Ta$  в тех же профилях выветривания, наоборот, характерно относительно равномерное распределение. Максимальное содержание  $Ta$  превышает самые низкие его содержания не более чем в 2—3 раза. Величины коэффициентов вариации этого элемента невелики (в коре выветривания на амфиболитах — 39,0; на известняках — 18,0; на сланцах — 22,0; на габбро — 14,0; табл. 13). В бурых железняках  $Ta$  распределен также равномерно (значение коэффициента вариации 20,0; табл. 13). Во всех изученных профилях выветривания содержания  $Nb$  превышают содержания  $Ta$  в 9—18 раз, за исключением коры выветривания на габбро, где отношение  $Nb:Ta$  равно двум.

$Th$  в корах выветривания района распределен равномерно. За исключением единственной пробы из профиля выветривания габбро, где отмечается повышенное ( $11 \cdot 10^{-4}\%$ ) содержание  $Th$ , во всех остальных пробах содержание этого элемента изменяется в узком интервале значений от  $1,5 \cdot 10^{-4}$  до  $5,0 \cdot 10^{-4}\%$ . Величины коэффициентов вариации для содер-

Таблица 12

в коре выветривания, горизонтах сидеритизации и бурых железняках района

TiO <sub>2</sub> /FeO		n·10 <sup>2</sup>					
		Ti/Nb		Ti/Ta		Ti/Th	
пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее
0,34—11,37	3,75 (20)	4,50—29,20	13,54 (4)	91,25—226,99	123,03 (4)	44,3—74,4	64,2 (3)
0,23—16,39	5,52 (25)	5,46—8,35	4,60 (2)	69,29—239,74	148,28 (3)	53,2—54,4	53,8 (2)
1,37—20,00	8,79 (7)	10,13—42,00	26,12 (3)	46,66—215,33	119,08 (3)	55,0—73,0	64,0 (2)
1,00—2,96	2,00 (5)	12,32—88,46	50,39 (2)	33,12—35,33	34,25 (2)	4,9—23,4	14,1 (2)
0,04—0,23	0,14 (7)	—	—	—	—	—	—
0,41—11,25	3,53 (6)	2,77—8,57	5,29 (5)	18,75—198,00	71,17 (5)	7,8—99,0	53,4 (2)

жаний теория в исследованных корах выветривания невелики (табл. 13). В бурых железняках Th распределен также равномерно.

В распределении SiO<sub>2</sub> в изученных профилях выветривания района устанавливается картина, обратная таковой для TiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Вверх по разрезу коры выветривания содержание SiO<sub>2</sub> обычно уменьшается. Максимальное содержание SiO<sub>2</sub> (до 60,58%) отмечено в коре выветривания на известняках, содержащих нередко значительное количество кварца (табл. 10). Величины коэффициентов вариации для содержаний SiO<sub>2</sub> в коре выветривания на амфиболитах, известняках, сланцах и габбро равны, соответственно, 17,0; 21,0; 25,0 и 2,0 (табл. 13).

Среднее значение отношения TiO<sub>2</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> уменьшается от 0,12 в коре выветривания амфиболитов и известняков до 0,03 в профиле выветривания габбро, что связано с уменьшением содержания титана и увеличением содержания алюминия в этих породах. Максимальная величина коэффициента вариации этого отношения 59,0 (табл. 13) устанавливается в коре выветривания амфиболитов, в которых титан распределен неравномерно (гл. V), а минимальная 10,0 (табл. 13) — в профиле выветривания габбро, в которых этот элемент распределен равномерно. Таким образом, величина коэффициента вариации для отношения TiO<sub>2</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в изученных профилях выветривания отражает характер распределения этих элементов в коренных породах. В горизонтах сидеритизации и в бурых железняках величины этого отношения отличаются незначительно от таковых в профилях выветривания на амфиболитах, известняках, сланцах.

Отношение TiO<sub>2</sub>:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>ок</sup> и его коэффициенты вариации в изученных корах выветривания района изменяются совершенно аналогично описанному отношению TiO<sub>2</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В горизонтах сидеритизации отношение TiO<sub>2</sub>:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>ок</sup> несколько (до 1,5 раз) возрастает, а в бурых железняках уменьшается в 2—10 раз по сравнению со значениями этого отношения в исследованных профилях выветривания. Для отношения TiO<sub>2</sub>:FeO во всей коре выветривания района характерно значительное изменение его значений. Коэффициенты вариации для этого отношения в изученных профилях выветривания велики: на амфиболитах — 101,0; на известняках — 97,0; на сланцах — 112,0; на габбро — 80,0 (табл. 13). В горизон-

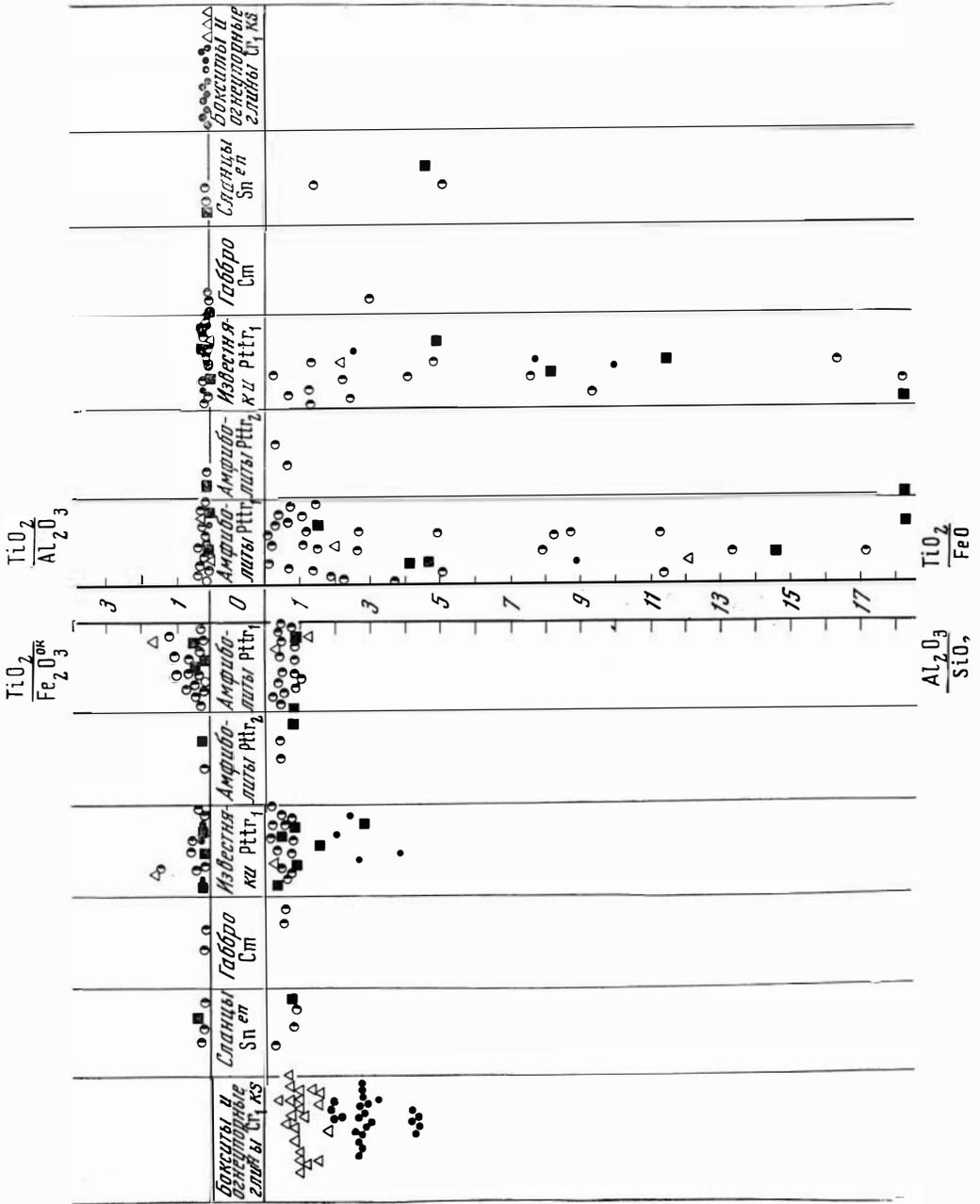


Рис. 20. Значения отношений  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{TiO}_2/\text{FeO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  в коре выветривания, глинах и бокситах. Условные обозн. те же, что и на рис. 17. На оси абсцисс указаны названия коренных пород

тах сидеритизации величина отношения  $TiO_2 : FeO$  изменяется от 0,04 до 0,28 и в среднем в 10—60 раз ниже, чем в других продуктах выветривания.

Средние значения отношения  $Ti : Nb$  в изученных профилях выветривания таковы (в  $n \cdot 10^2$ ): на амфиболитах — 13,54; на известняках — 4,60; на сланцах — 26,12; на габбро — 50,39; в бурых железняках — 5,29. Средние значения отношения  $Ti : Ta$  в тех же профилях выветривания равны, соответственно (в  $n \cdot 10^2$ ): 123,03; 148,28; 119,08; 34,25; 71,17. Разброс значения для первого отношения меньше, чем для второго, что подтверждается более высокими значениями коэффициентов вариации для  $Ti : Ta$  (в коре выветривания на амфиболитах — 71,0; на известняках — 79,0; на сланцах — 72,0; на габбро — 13,0; в бурых железняках — 83,0; табл. 13) в сравнении с  $Ti : Nb$  (значения коэффициентов вариации равны, соответственно, 63,0; 61,0; 8,0; 33,0; табл. 13).

Средние значения отношения  $Ti : Th$  (в  $n \cdot 10^2$ ) в коре выветривания на амфиболитах — 53,3; на известняках — 53,8; на сланцах — 64,0; на габбро — 14,1; в бурых железняках — 53,4. Наибольший разброс значений этого отношения устанавливается в профиле выветривания габбро и в бурых железняках.

Алюмокремневый модуль (отношение  $Al_2O_3 : SiO_2$ ) в изученных профилях выветривания района меньше единицы; значения его изменяются незначительно, что подтверждается небольшой разницей между величинами коэффициентов вариации этого модуля: максимальными (46,0; табл. 13) в коре выветривания на сланцах и минимальными (15,0; табл. 13) в коре выветривания на габбро.

Графическое изображение соотношений титана с изученными элементами-гидролизатами и железом (рис. 21) позволяет констатировать следующее. В исследованных профилях выветривания района достаточно определенно устанавливается прямая корреляционная связь  $Ti$  с  $Al$ ,  $Nb$  и  $Fe^{3+}$ . Это убедительно подтверждается также относительно высокими значениями соответствующих коэффициентов корреляции (табл. 13). Корреляционная взаимосвязь  $Ti$  с  $Ta$ ,  $Th$  и  $Fe^{2+}$  в тех же профилях выветривания почти отсутствует, что доказывается низкими значениями коэффициентов корреляции между этими элементами (табл. 13).

Дополнительные данные о распределении и поведении исследуемых элементов были получены путем вычисления их содержания и коэффициентов концентрации в различных горизонтах изученных профилей с учетом изменения объемного веса исходных пород при выветривании (табл. 14). Все расчеты произведены согласно методическим указаниям Б. М. Михайлова [70] и Н. А. Лисицной [62].

В распределении и поведении титана и алюминия устанавливаются следующие черты сходства. В изученных профилях выветривания района содержания обоих элементов возрастают к верхним переотложенным горизонтам. В горизонтах сидеритизации средние содержания и  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  примерно такие же, как в верхних переотложенных горизонтах. В бурых железняках содержания обоих элементов обычно в 1,5—3,0 раза ниже, чем в других горизонтах профилей выветривания. Коэффициенты концентрации для  $TiO_2$  в непереотложенных горизонтах выветривания обычно выше единицы и изменяются от 1,2 до 2,0; в горизонтах сидеритизации они меньше единицы и в среднем равны 0,8. Коэффициенты концентрации (средние значения) для  $Al_2O_3$  в тех горизонтах выветривания составляют, соответственно, 1,3 и 0,7. Это свидетельствует о некотором выносе титана и алюминия в нижних непереотложенных горизонтах и об их незначительном накоплении в горизонтах сидеритизации. В верхних переотложенных горизонтах, составляющих обычно основную часть профиля выветривания, так же как и в коре выветривания в целом, коэффициенты концентрации титана и алюминия близки или равны единице, что

**Значения коэффициентов вариации и корреляции для изучаемых окислов**

Объекты исследований	Значения коэффициентов вариации для изучаемых окислов (элементов), %							
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>OK</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
Кора выветривания на амфиболитах	17,0	52,0	26,0	44,0	127,0	127,0	39,0	33,0
Кора выветривания на известняках	21,0	51,0	22,0	34,0	79,0	141,0	18,0	—*
Кора выветривания на сланцах	25,0	33,0	21,0	27,0	76,0	121,0	22,0	33,0
Кора выветривания на габбро	2,0	9,0	7,0	20,0	40,0	112,0	14,0	30,0
Горизонты сидеритизации в коре выветривания	23,0	43,0	16,0	34,0	35,0	—	—	—
Бурые железняки в коре выветривания	42,0	45,0	26,0	40,0	97,0	114,0	20,0	—

\* Данные по коре выветривания, залегающей на амфиболитах и известняках.

свидетельствует об отсутствии привноса — выноса этих элементов в процессе формирования продуктов выветривания в районе.

В распределении Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>OK</sup> и FeO, рассчитанных с учетом изменения объемного веса исходных пород, устанавливается то же, что отмечалось выше при анализе распределения содержаний этих элементов по данным химических анализов. Коэффициенты концентрации для Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>OK</sup> в профилях выветривания обычно меньше единицы; средние значения этих коэффициентов изменяются от 0,4 (в коре выветривания на габбро) до 0,6 (в коре выветривания на амфиболитах), что означает накопление этого окисла в продуктах выветривания. Коэффициенты концентрации для FeO в тех же профилях выветривания, наоборот, всегда больше единицы, и средние значения этих коэффициентов изменяются от 3,26 (в коре выветривания на габбро) до 81,81 (в коре выветривания на сланцах), свидетельствуя об уменьшении двухвалентного железа за счет его окисления при выветривании.

Количества Nb, Ta и Th, подсчитанные с учетом изменения объемного веса материнских пород, распределяются в изученных корах выветривания так же, как содержания этих элементов по данным химических анализов. Неравномерное распределение Nb обуславливает изменение средних значений коэффициента концентрации этого элемента от 0,6 (в коре выветривания на амфиболитах) до 4,82 (в коре выветривания на габбро). Равномерно распределенные в изученных профилях выветривания Ta и Th имеют коэффициенты концентрации, близкие к единице. Средние значения этих коэффициентов изменяются для Ta от 0,85 до 1,30, а для Th — от 1,16 до 1,20, что свидетельствует об отсутствии привноса — выноса этих элементов в коре выветривания района. Таким образом, распределение содержаний Ti, Al, Nb, Ta, Th, Fe<sup>3+</sup> и Fe<sup>2+</sup> в изученных профилях выветривания, подсчитанных с учетом изменения объемного веса выветрелых пород, подтверждает характер распределения этих элементов, описанный по данным химических анализов. Анализ изменений значений коэффициентов концентрации позволяет судить о поведении исследуемых элементов в корах выветривания района.

Сравнение с содержаниями исследуемых элементов в коренных породах и обсуждение результатов приводится ниже.

Таблица 13

(элементов) и отношений между ними в коре выветривания коренных пород

Значения коэффициентов вариации для отношений изучаемых окислов (элементов), %							Значения коэффициентов корреляции (r) для пар изучаемых окислов (элементов)						
$\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{ок}}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	Ti Nb	Ti Ta	Ti Th	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{ок}}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	Ti Nb	Ti Ta	Ti Th
31,0	59,0	90,0	101,0	63,0	71,0	23,0	-0,45 ±0,05	+0,57 ±0,04	+0,47 ±0,02	+0,28 ±0,01	+0,66*	+0,10	+0,15
36,0	41,0	67,0	97,0	—	79,0	—	-0,68 ±0,07	+0,65 ±0,05	+0,22 ±0,01	+0,06 ±0,01			
46,0	44,0	84,0	112,0	61,0	72,0	20,0	-0,94 ±0,09	+0,88 ±0,07	+0,72 ±0,03	+0,46 ±0,02	+0,79	—	—
15,0	10,0	30,0	80,0	3,0	13,0	93,0	-0,95	+0,37	—	—	—	—	—
27,0	51,0	53,0	71,0	—	—	—	+0,26	+0,40	+0,31	+0,50	—	—	—
39,0	50,0	70,0	110,0	33,0	33,0	37,0	+0,76	+0,70	+0,85	+0,37	+0,87	—	—

1) В коре выветривания устанавливается прямая корреляционная взаимосвязь между  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  (рис. 21), тогда как в коренных породах между окислами этих элементов существует обратная пропорциональная зависимость (рис. 15);

2) в продуктах выветривания устанавливается прямая пропорциональная зависимость между  $TiO_2$  и  $Fe_2O_3^{ок}$ ; в материнских породах такая же зависимость существует между  $TiO_2$  и  $FeO$ ;

3) во всех изученных профилях выветривания района от коренных пород наследуется прямая корреляционная связь  $Ti$  с  $Nb$  и отсутствие таковой для  $Ti$  и  $Ta$ ;

4) в коре выветривания практически исчезает корреляционная взаимосвязь  $Ti$  с  $Th$ , тогда как в коренных породах такая связь между этими элементами устанавливается достаточно определенно.

Таким образом, соотношения  $Ti$  с другими элементами-гидролизатами ( $Al$ ,  $Nb$ ,  $Ta$ ,  $Th$ ), а также железом ( $Fe^{3+}$  и  $Fe^{2+}$ ), существующие в коренных породах, при выветривании последних наследуются и изменяются.

Отмеченные изменения в соотношении титана с другими изученными элементами следует связывать с теми превращениями коренных пород, которые происходят при их выветривании. Суть этих превращений состоит в гидролизе минералов материнских пород. Этот процесс достаточно обстоятельно рассмотрен в ряде работ [26, 88, 103]. Выделенные три группы минералов коренных пород (гл. V) в процессе гидролиза ведут себя по-разному. Наиболее легко гидролизуется группа фемических минералов. Промежуточное положение занимает группа салических минералов, причем основные плагиоклазы разлагаются легче кислых и калиевых полевых шпатов. Наиболее устойчивы при гидролизе акцессорные минералы [103]. Соответствующие расчеты показывают (табл. 15), что в коре выветривания с ильменитом — главным титановым минералом — связано не более 40% общего количества  $TiO_2$ , содержащегося в ней, тогда как в коренных породах с этим минералом связано до 70—90%  $TiO_2$  (табл. 9, рис. 16). Такое снижение роли ильменита как главного концентратора титана в коре выветривания следует объяснять гидролизом (разложением) фемических и салических минералов, а также сфена, поставляющих титан в дисперсную фракцию коры выветривания. Доля титана, поступаю-

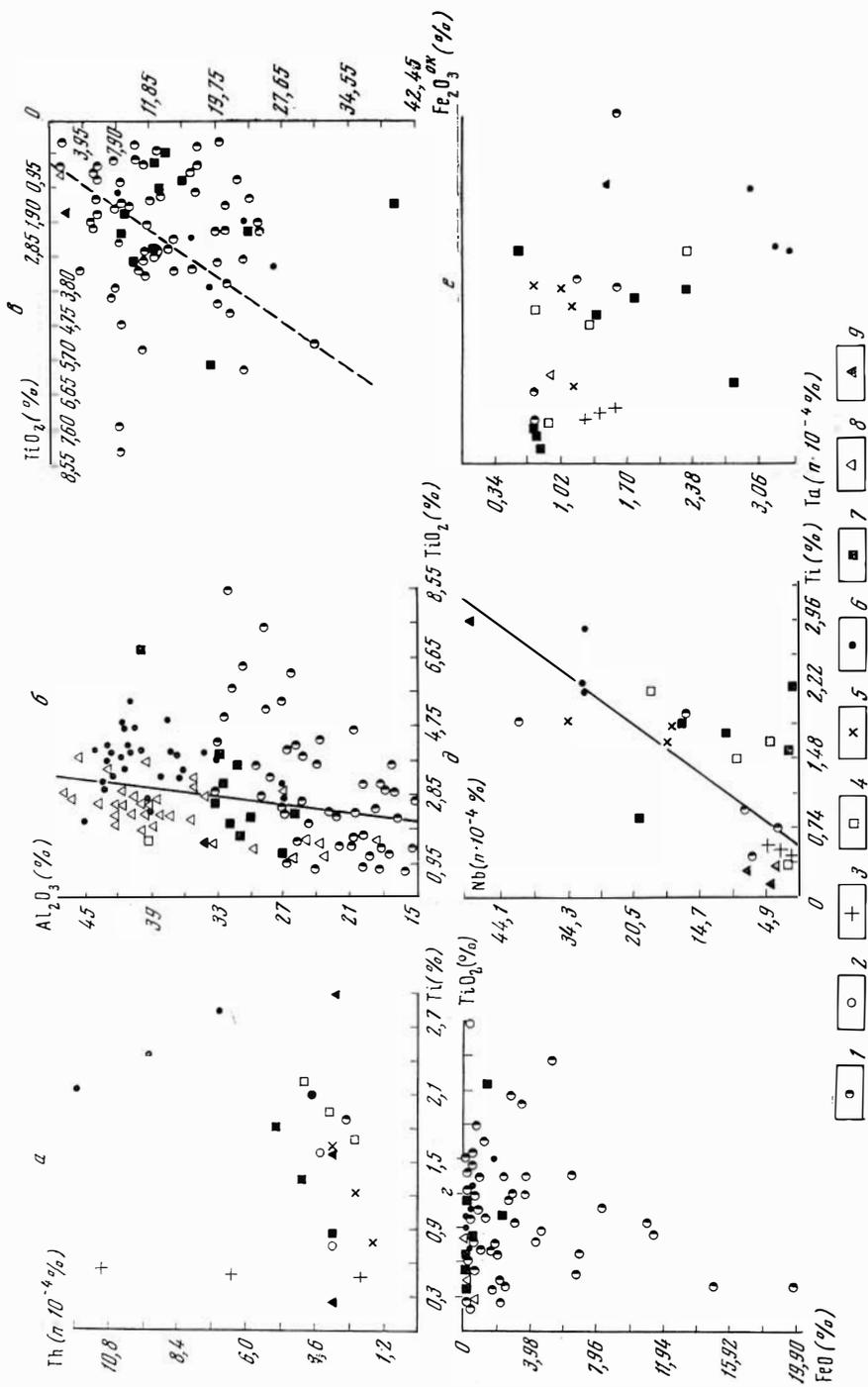


Рис. 21. Соотношения титана в коре выветривания и продуктах ее перерождения (глинах, бокситах) а — с торием, б — с алюминием, в — с окисным железом, г — с закисным железом, ж — с шнобием, з — с танталом. Пробры из коры выветривания, залегающей на: 1 — амфиболитах  $PtTi_2$ ; 2 — амфиболитах  $PtTi_2$ ; 3 — таборо; 4 — сланцах; 5 — известняках; пробры из: 6 — бокситов; 7 — пестроцветных глин; 8 — огнеупорных глин; 9 — бурых железняков

Таблица 14

Средние значения содержания и коэффициентов концентрации исследуемых элементов в коре выветривания, горизонтах сидеритизации и бурых железняках, рассчитанные с учетом объемного веса исходных пород и продуктов их выветривания

Объекты исследования	$n, g/cm^3$						$n \cdot 10^{-6}, g/cm^3$						Коэффициент концентрации окислов (элементов): $N$ (содержание окисла (элемента) в $g/cm^3$ в исходной породе)		
	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th	$K = \frac{n}{N}$
Кора выветривания на амфиболитах: непереотложная; переотложная; кора выветривания в целом	0,022 (3)	0,34 (3)	0,20 (3)	0,033 (3)	9,0 (2)	1,68 (2)	3,77 (1)	2,0	1,3	0,7	13,7	0,5	1,0	0,9	
	0,065 (17)	0,40 (17)	0,23 (17)	0,027 (14) ●	62,2 (1)	2,46 (2)	7,14 (1)	1,0	1,0	0,6	13,8	0,6	1,3	2,4	
	0,050 (20)	0,38 (20)	0,20 (20)	0,020 (17)	26,7 (3)	2,07 (4)	5,45 (2)	1,1	1,0	0,6	14,2	0,6	1,1	1,1	
Кора выветривания на известняках	0,045 (25)	0,37 (25)	0,26 (25)	0,011 (25)	42,40 (3)	1,65 (3)	3,59 (2)	—	—	—	—	—	—	—	
	0,039 (7)	0,40 (7)	0,33 (7)	0,017 (7)	15,69 (3)	2,3 (3)	5,32 (3)	1,2	0,9	0,5	81,81	2,27	1,30	1,2	
Кора выветривания на габбро	0,043 (5)	0,42 (5)	0,25 (5)	0,049 (5)	3,99 (2)	2,40 (2)	10,78 (2)	1,3	1,2	0,4	3,26	4,82	0,85	1,2	
	0,051 (7)	0,52 (7)	0,15 (7)	0,41 (7)	—	—	—	0,8	0,7	0,5	0,6	—	—	—	
Горизонты сидеритизации	0,045 (6)	0,29 (6)	1,59 (6)	0,018 (6)	49,33 (5)	2,93 (5)	9,15 (2)	—	—	—	—	—	—	—	

шего в дисперсную фракцию выветрелых продуктов, при изменении ильменита очень незначительна, так как этот минерал, как отмечалось выше, практически неизменен в коре выветривания и лишь незначительно лейкоксенизирован в самых верхних ее горизонтах. Таким образом, в коре выветривания района происходит некоторое обогащение титаном дисперсной части выветрелых продуктов за счет разложения и освобождения этого элемента из структуры фемических и салических порообразующих минералов коренных пород, а также за счет разрушения неустойчивых собственных минералов титана (в нашем случае — сфена). При этом роль ильменита как главного концентратора титана в сравнении с исходными породами снижается.

Таблица 15

Расчет доли  $TiO_2$ , связанной с наиболее распространенными титановыми минералами в коре выветривания на изученных участках

Число изученных проб*	Содержание титановых минералов, вес. %	Содержание** $TiO_2$ в минералах (вес. %)	Количество $TiO_2$ в минерале, приходящееся на 1 г материала коры выветривания, мг	Процент $TiO_2$ , приходящийся на данный минерал	Содержание $TiO_2$ в пробах	
					мг/г	%
480	1. Ильменит: от 0,35 до 8,00	52,66	1,84	4,0	45,9	4,59
			32,00	40,0	80,0	8,00
15	2. Рутил: от 0,03 до 0,61	100,00	0,29	1,6	16,6	1,66
			5,97	14,0	45,9	4,59

\* При расчетах были использованы также данные Л. Г. Кочурова (1963 г.).

\*\* Содержание  $TiO_2$  в минерале теоретическое.

Вместе с титаном в растворы при разрушении фемических, салических и неустойчивых титановых минералов коренных пород переходят и другие элементы-гидролизаты: Al, Nb, Ta, Th. Установленные соотношения между этими элементами в коре выветривания [103] следует объяснять их перераспределением в растворах с последующим захватом глинистыми минералами, образующимися как по фемическим, так и по салическим минералам. При этом главную роль играет близость химических свойств элементов-гидролизатов, определяющая совместность их нахождения в растворах при гидролизе. Структурный запрет, который ограничивает вхождение этих элементов в минералы коренных пород, перестает действовать, ибо в процессе выветривания (гидролиза) структура этих минералов не сохраняется. Однако, как указывают А. Б. Ронов и А. А. Мигдиков, присутствие значительного количества аксессуарных и рудных минералов нарушает корреляцию между элементами-гидролизатами в корках выветривания. Учитывая достаточно высокое содержание ильменита (до 6—8%), а иногда и рутила (до 1%) в коре выветривания исследованного района, следует признать, что ослабленная корреляционная связь титана и алюминия и практически полное отсутствие таковой для титана с танталом и торием могут быть удовлетворительно объяснены названной выше причиной.

Указания о существовании связи между титаном и железом в корках выветривания содержатся в работах ряда исследователей. Так, при рассмотрении особенностей распределения и форм нахождения титана в коре выветривания основных пород Н. А. Лисицына [61] отмечает, что в каолинитовой коре выветривания с небольшим содержанием свободного глинозема в верхней зоне прочной связи титана с гидроксидами и оксидами железа не наблюдается. Однако используя данные зарубежных ис-

следователей, автор показала, что при более интенсивном разложении пород до стадии свободных окислов прочная взаимосвязь титана и железа устанавливается определенно. Возможность установления структурной связи  $Ti^{4+}$  с  $Fe^{3+}$  в решетке железистых минералов вполне реальна, так как размеры ионных радиусов титана и железа ближе, чем титана и алюминия. По Х. Штунцу [121], ионные радиусы  $Ti^{4+}$  0,68 Å,  $Fe^{3+}$  0,64 Å; по Дж. М. Брэю —  $Ti^{4+}$  0,64 Å и  $Fe^{3+}$  0,67 Å, тогда как, по данным этих исследователей,  $Al^{3+}$  имеет ионный радиус 0,51—0,57 Å. Существование тесной взаимосвязи титана и железа на основании детального изучения отдельных фракций продуктов выветривания (бокситов) убедительно показано М. В. Пастуховой [83]. Изложенный в настоящей главе материал также позволяет сделать вывод о связи титана с железом в коре выветривания района. Об этом свидетельствуют высокие значения коэффициента корреляции между  $TiO_2$  и  $Fe_2O_3^{ок}$  ( $r$   $TiO_2/Fe_2O_3^{ок}$  в коре выветривания на амфиболитах  $+0,47 \pm 0,02$ ; на известняках  $+0,22 \pm 0,01$ ; на сланцах  $+0,72 \pm 0,03$ ); близкие значения коэффициентов вариации для содержания этих элементов и одинаковый характер их распределения в изученных профилях выветривания. Таким образом, в коре выветривания района титан связан определенными соотношениями не только с близкими, геохимически родственными ему элементами-гидролизатами (Al, Nb, Ta, Th), но и с железом. Основа тесной геохимической связи титана и железа, которая наиболее четко проявляется при интенсивном разложении пород до стадии свободных окислов (латеритизация), закладывается уже в период формирования каолиновой коры выветривания.

### Распределение Ti, Al, Nb, Ta, Th и Fe в различных фракциях, выделенных из материала коры выветривания района

Содержания исследуемых элементов и их соотношения в различных фракциях продуктов выветривания приведены в табл. 16, 17 и показаны на рис. 22, 23. Анализируя эти данные, отметим следующее.

1. Во всех изученных профилях выветривания района минимальные содержания  $TiO_2$  устанавливаются во фракции  $<0,001$  мм. С увеличением крупности материала растут и содержания  $TiO_2$ . Максимальные содержания  $TiO_2$  (до 11,50—14,99%) отмечаются во фракциях 0,01—0,05 мм и  $>0,05$  мм, где фиксируются и самые высокие содержания наиболее распространенного титанового минерала — ильменита (табл. 10). Средние количества  $TiO_2$  в этих фракциях превышают таковые во фракции  $<0,001$  мм в 3—5 раз. Содержания  $TiO_2$  в различных фракциях непосредственно связаны с количеством этого элемента в исходных породах. Поэтому наиболее высокие содержания  $TiO_2$  устанавливаются во фракциях из материала коры выветривания на амфиболитах, характеризующихся повышенной титаноносностью (глава V), а самые низкие — во фракциях из выветрелого габбро, в котором количество титана очень мало. Наиболее равномерно  $TiO_2$  распределена во фракциях  $<0,001$  мм (значения коэффициентов вариации для содержаний  $TiO_2$  в них минимальны; табл. 21). Вместе с ростом крупности выветрелого материала и содержаний  $TiO_2$  в нем увеличивается неравномерность распределения двуокиси титана, что подтверждается высокими значениями коэффициентов вариации для содержаний этого элемента во фракциях 0,01—0,05 мм и  $>0,05$  мм (табл. 18, 19). В различных фракциях, выделенных из сидеритизированных горизонтов,  $TiO_2$  распределена аналогично вышеописанному.

В сравнении с  $TiO_2$  максимальные содержания  $Al_2O_3$  устанавливаются во фракции  $<0,001$  мм, а минимальные — в наиболее крупных фракциях: крупноалевролитовой 0,01—0,05 мм и песчаной  $>0,05$  мм. Средние

Содержание Si, Ti, Al, Nb, Ta, Th и Fe во фракциях из коры

Объекты исследований	Фракция > 0,05 мм						
	n, вес. %				n·10 <sup>-4</sup> , вес. %		
	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
Кора выветривания: на амфиболитах	0,81*	11,24	9,15	0,47	0,00	0,19	2,5
	<u>14,99</u>	<u>28,98</u>	<u>47,88</u>	<u>28,16</u>	<u>2,96</u>	<u>0,39</u>	<u>2,5</u>
	5,55(25)	19,76(25)	22,56(25)	6,64 (20)	1,48(2)	0,29(2)	2,5(2)
на известняках	0,17	5,22	2,82	0,40	28,87	0,02	2,7
	<u>11,41</u>	<u>28,23</u>	<u>39,77</u>	<u>20,93</u>			
	3,70 (20)	14,71(20)	19,72(20)	1,98(18)			
на метаморфических сланцах	0,32	10,91	23,12	0,14	8,20	0,36	1,8
	<u>2,95</u>	<u>18,72</u>	<u>36,44</u>	<u>13,82</u>			
	1,77 (7)	15,76(7)	29,37(7)	4,65(6)			
на габбро	0,74	23,80	15,20	0,07	7,68	1,53	12,2
	<u>0,90</u>	<u>26,00</u>	<u>18,22</u>	<u>0,44</u>			
	0,82 (5)	24,90(5)	16,71(5)	0,20(4)			
Горизонты сидеритизации	1,11	14,74	5,09	20,68	—	—	—
	<u>1,76</u>	<u>20,00</u>	<u>10,92</u>	<u>27,99</u>			
	1,39 (4)	17,27(4)	7,24(4)	23,39(4)			

Объекты исследований	Фракция 0,01—0,001 мм							
	n, вес. %					n·10 <sup>-4</sup> , вес. %		
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
Кора выветривания: на амфиболитах	29,31	0,67	16,91	2,29	0,00	Сл.	1,39	2,0
	<u>48,53</u>	<u>5,13</u>	<u>36,09</u>	<u>26,13</u>	<u>3,43</u>	<u>15,38</u>	<u>1,63</u>	<u>15,0</u>
	42,26 (25)	2,29 (25)	28,69 (25)	11,56 (25)	0,50 (23)	7,70 (2)	1,51 (2)	8,50 (2)
на известняках	36,40	1,35	18,65	2,95	0,07	15,38	3,76	2,6
	<u>45,08</u>	<u>5,40</u>	<u>36,66</u>	<u>18,85</u>	<u>0,35</u>			
	40,33 (20)	2,77 (20)	30,58 (20)	9,40 (20)	0,16 (17)			
на метаморфических сланцах	39,51	1,55	25,43	6,40	0,14	8,73	0,45	2,3
	<u>53,72</u>	<u>4,59</u>	<u>35,34</u>	<u>9,98</u>	<u>0,35</u>			
	44,68 (7)	3,13 (7)	31,36 (7)	7,88 (7)	0,31 (7)			
на габбро	44,63	0,61	25,49	10,22	0,22	0,83	1,80	8,0
	<u>45,50</u>	<u>0,75</u>	<u>28,79</u>	<u>15,05</u>	<u>0,30</u>			
	45,06 (5)	0,68 (5)	27,14 (5)	12,63 (5)	0,26 (5)			
Горизонты сидеритизации	42,29	0,82	21,02	4,88	1,07	—	—	—
	<u>50,83</u>	<u>2,72</u>	<u>35,76</u>	<u>7,45</u>	<u>2,86</u>			
	46,19 (5)	1,73 (5)	28,46 (5)	6,19 (5)	2,00 (5)			

\* Здесь и далее в таблицах в числителе дроби—минимальное содержание окисла (элемента); в знаменателе — максимальное; цифра внизу слева — среднее содержание окисла (элемента); цифра в скобках — число анализов, из которых высчитано среднее содержание.

Таблица 16

## выветривания и горизонтов сидеритизации

Фракция 0,05—0,01 мм							
n, вес. %					n·10 <sup>-4</sup> вес. %		
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
<u>28,60</u>	<u>1,83</u>	<u>16,57</u>	<u>3,55</u>	<u>0,07</u>	Сл.	<u>1,63</u>	<u>3,3</u>
<u>47,92</u>	<u>10,50</u>	<u>34,61</u>	<u>24,13</u>	<u>2,91</u>	<u>0,83</u>	<u>2,45</u>	<u>5,0</u>
41,27 (25)	4,21 (25)	26,29 (25)	11,77 (25)	1,24 (22)	0,40 (2)	2,04 (2)	4,2 (2)
<u>33,40</u>	<u>2,20</u>	<u>15,12</u>	<u>6,00</u>	<u>0,00</u>			
<u>48,74</u>	<u>11,50</u>	<u>33,74</u>	<u>18,91</u>	<u>2,15</u>	0,00	3,68	5,0
40,04 (20)	5,33 (20)	24,53 (20)	11,68 (20)	0,55 (17)	(I)	(I)	(I)
<u>33,18</u>	<u>1,70</u>	<u>15,05</u>	<u>5,71</u>	<u>0,14</u>			
<u>67,96</u>	<u>8,70</u>	<u>31,58</u>	<u>18,01</u>	<u>0,86</u>	—	1,14	4,0
46,14 (7)	5,25 (7)	24,58 (7)	11,58 (7)	0,57 (7)		(I)	(I)
<u>43,62</u>	<u>1,02</u>	<u>23,94</u>	<u>11,03</u>	<u>0,07</u>			
<u>44,89</u>	<u>1,03</u>	<u>27,69</u>	<u>15,93</u>	<u>0,15</u>	0,83	1,63	11,0
44,25 (5)	1,02 (5)	25,81 (5)	13,48 (5)	0,08 (5)	(I)	(I)	(I)
<u>37,56</u>	<u>1,95</u>	<u>17,66</u>	<u>5,42</u>	<u>3,07</u>			
<u>48,90</u>	<u>4,50</u>	<u>30,02</u>	<u>7,23</u>	<u>7,22</u>	—	—	—
43,04 (5)	2,84 (5)	25,91 (5)	6,24 (5)	4,90 (5)			

Таблица 16 (окончание)

Фракция < 0,001 мм							
n, вес. %					n·10 <sup>-4</sup> , вес. %		
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
<u>33,80</u>	<u>0,56</u>	<u>22,02</u>	<u>2,86</u>	<u>0,07</u>	Сл.	<u>1,63</u>	<u>3,0</u>
<u>47,27</u>	<u>2,40</u>	<u>37,00</u>	<u>22,81</u>	<u>0,57</u>	<u>5,24</u>	<u>2,45</u>	<u>5,0</u>
41,69 (23)	1,23 (23)	30,42 (23)	13,30 (23)	0,21 (23)	2,60 (2)	2,04 (2)	4,0 (2)
<u>33,73</u>	<u>0,34</u>	<u>23,55</u>	<u>6,47</u>	<u>0,14</u>			
<u>44,07</u>	<u>1,90</u>	<u>35,73</u>	<u>22,52</u>	<u>0,29</u>	4,33	1,96	2,6
39,51 (20)	1,15 (20)	31,33 (20)	12,32 (20)	0,16 (20)	(I)	(I)	(I)
<u>34,06</u>	<u>0,32</u>	<u>28,13</u>	<u>11,11</u>	<u>0,14</u>			
<u>44,01</u>	<u>2,47</u>	<u>30,75</u>	<u>21,53</u>	<u>0,57</u>	Сл.	1,14	2,3
39,01 (7)	1,39 (7)	29,82 (7)	15,76 (7)	0,42 (7)	(I)	(I)	(I)
<u>44,35</u>	<u>0,13</u>	<u>23,94</u>	<u>12,47</u>	<u>0,22</u>			
<u>45,92</u>	<u>0,34</u>	<u>26,68</u>	<u>16,06</u>	<u>0,29</u>	0,83	1,60	5,0
45,13 (5)	0,23 (5)	25,31 (5)	14,26 (5)	0,25 (5)	(I)	(I)	(I)
<u>44,03</u>	<u>0,66</u>	<u>28,64</u>	<u>4,99</u>	<u>0,58</u>			
<u>48,56</u>	<u>1,37</u>	<u>36,65</u>	<u>6,92</u>	<u>0,92</u>	—	—	—
47,04 (4)	1,04 (3)	32,58 (3)	5,91 (4)	0,70 (4)			

Значения отношений  $\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$ ;  $\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$ ;  $\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{ок}}$ ;  $\frac{TiO_2}{FeO}$ ;  $\frac{Ti}{Nb}$ ;  $\frac{Ti}{Ta}$  и  $\frac{Ti}{Th}$  во фракциях из коры выветривания и горизонтов сидеритизации

Объекты исследований	Фракция > 0,05 мм						Фракция 0,05—0,01 мм					
	n			n · 10 <sup>2</sup>			n			n · 10 <sup>2</sup>		
	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{ок}}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	$\frac{Ti}{Nb}$	$\frac{Ti}{Ta}$	$\frac{Ti}{Th}$	$\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{ок}}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	$\frac{Ti}{Nb}$	$\frac{Ti}{Ta}$
Кора выветривания: на амфиболитах	0,06*	0,07	0,09	0,00	474,35	27,2	0,35	0,07	0,76	0,00	66,87	21,9
	0,64	1,04	8,37	23,1	4731,5	360,0	0,89	0,39	48,2	275,9	93,46	69,4
	0,26**	0,30	2,60	11,56	2452,96	193,6	0,65	0,15	13,58	137,95	80,16	45,6
на известняках	0,02	0,01	0,02				0,25	0,07	2,01	0,00		
	0,44	1,61	9,56	4,71	6800,0	50,7	0,89	0,53	67,78	0,00	99,45	73,2
	0,30	0,26	3,09				0,63	0,23	7,73			
на метаморфических сланцах	0,02	0,01	0,14				0,22	0,11	6,22			
	0,15	0,08	2,28	21,58	491,66	98,3	0,84	0,32	12,25		281,57	130,5
	0,09	0,06	1,21				0,62	0,19	10,20			
на габбро	0,03	0,04	0,90				0,54	0,03	6,80	73,49	37,42	5,6
	0,05	0,06	2,04	7,03	3,52	4,4	0,61	0,04	6,86			
	0,03	0,05	1,02				0,57	0,03	6,83			
Горизонты сидеритизации	0,07	0,10	0,03				0,40	0,07	0,33			
	0,08	0,30	0,08				0,79	0,17	1,37			
	0,07	0,22	0,05				0,60	0,11	0,67			

\* В числителе дробей—минимальное значение соответствующего отношения, в знаменателе — максимальное.

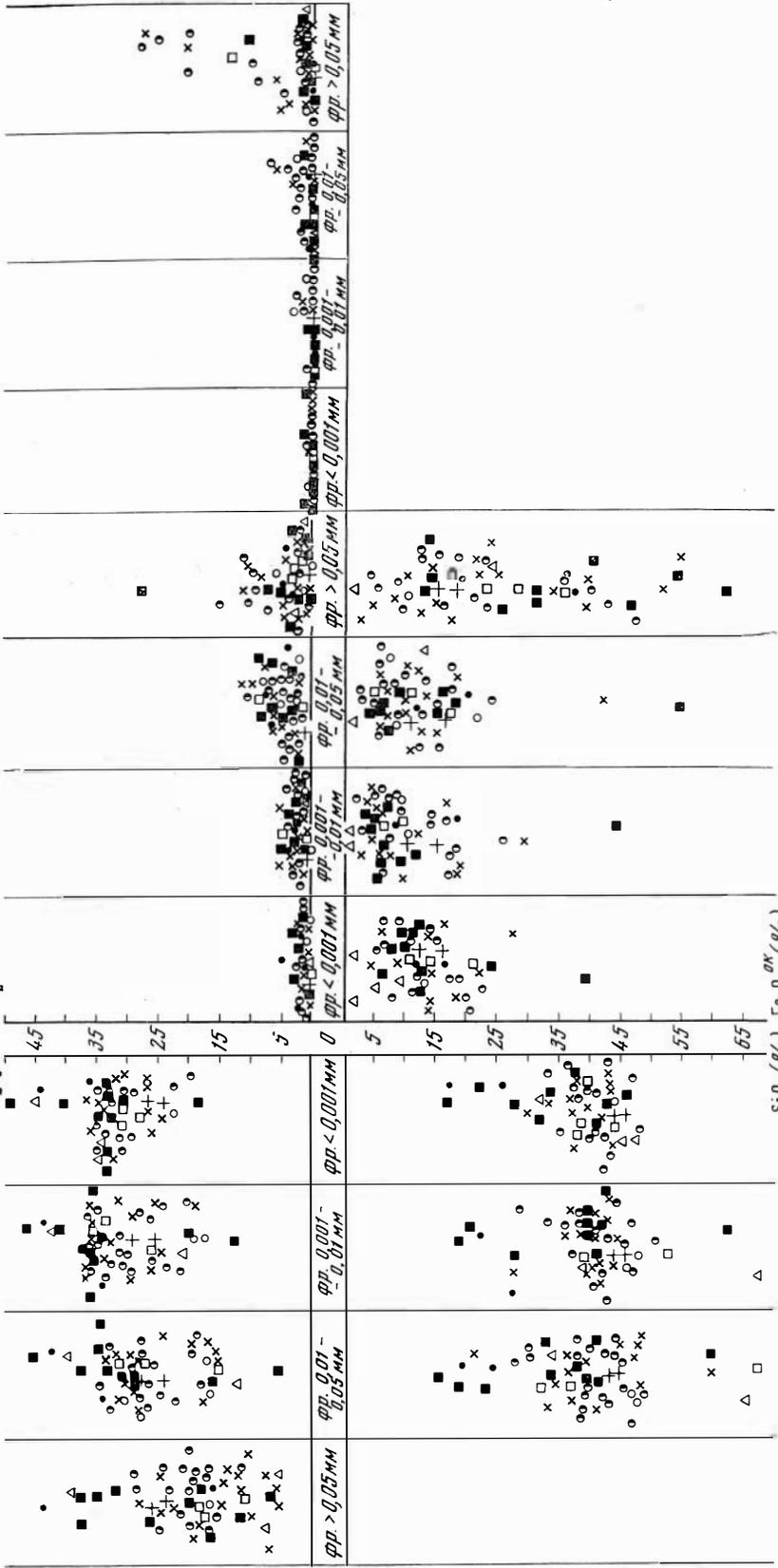
\*\* Цифра внизу означает среднее значение соответствующего отношения, вычисленное по числу анализов, указанному в табл. 16.

Таблица 17 (окончание)

Объекты исследования:	Фракция 0,01—0,001 мм										Фракция < 0,001 мм										
	п					п · 10 <sup>2</sup>					п					п · 10 <sup>2</sup>					
	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$
Кора выветривания: на амфиболитах	0,36	0,03	0,06	0,45	0,00	52,14	9,0	0,45	0,02	0,03	2,43	0,00	19,59	10,0	0,45	0,02	0,03	2,43	0,00	19,59	10,0
	0,91	0,12	1,17	42,1	8,84	97,84	42,6	0,92	0,07	0,41	23,14	9,54	30,67	16,0	0,92	0,07	0,41	23,14	9,54	30,67	16,0
на известняках	0,69	0,07	0,34	14,4	4,42	74,99	25,8	0,73	0,03	0,12	8,00	4,72	25,13	13,0	0,73	0,03	0,12	8,00	4,72	25,13	13,0
	0,43	0,04	0,09	5,39	13,91	56,91	82,3	0,61	0,01	0,02	1,17	14,54	32,14	24,4	0,61	0,01	0,02	1,17	14,54	32,14	24,4
на метаморфических сланцах	0,88	0,15	0,84	48,57	22,33	433,33	84,8	0,94	0,05	0,18	22,14	0,00	71,92	36,0	0,94	0,05	0,18	22,14	0,00	71,92	36,0
	0,75	0,09	0,33	12,74	54,21	25,00	5,6	0,79	0,03	0,09	8,48	24,09	11,11	4,1	0,79	0,03	0,09	8,48	24,09	11,11	4,1
на габбро	0,47	0,06	0,24	11,07	22,33	433,33	84,8	0,63	0,01	0,02	2,28	0,00	71,92	36,0	0,63	0,01	0,02	2,28	0,00	71,92	36,0
	0,86	0,13	0,45	23,21	22,33	433,33	84,8	0,90	0,08	0,16	17,64	0,00	71,92	36,0	0,90	0,08	0,16	17,64	0,00	71,92	36,0
Горизонты сидеритизации	0,72	0,09	0,37	15,79	54,21	25,00	5,6	0,77	0,04	0,08	7,44	24,09	11,11	4,1	0,77	0,04	0,08	7,44	24,09	11,11	4,1
	0,57	0,02	0,04	2,50	54,21	25,00	5,6	0,52	0,005	0,008	0,59	24,09	11,11	4,1	0,52	0,005	0,008	0,59	24,09	11,11	4,1
	0,63	0,02	0,07	2,77	54,21	25,00	5,6	0,60	0,01	0,02	1,17	24,09	11,11	4,1	0,60	0,01	0,02	1,17	24,09	11,11	4,1
	0,60	0,02	0,05	2,63	54,21	25,00	5,6	0,56	0,01	0,01	0,88	24,09	11,11	4,1	0,56	0,01	0,01	0,88	24,09	11,11	4,1
	0,41	0,02	0,11	0,31	54,21	25,00	5,6	0,58	0,01	0,13	1,13	24,09	11,11	4,1	0,58	0,01	0,13	1,13	24,09	11,11	4,1
	0,84	0,09	0,49	2,30	54,21	25,00	5,6	0,83	0,04	0,19	1,86	24,09	11,11	4,1	0,83	0,04	0,19	1,86	24,09	11,11	4,1
	0,62	0,05	0,25	1,03	54,21	25,00	5,6	0,69	0,02	0,15	1,49	24,09	11,11	4,1	0,69	0,02	0,15	1,49	24,09	11,11	4,1

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%) TiO<sub>2</sub> (%)

FeO (%)



SiO<sub>2</sub> (%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)

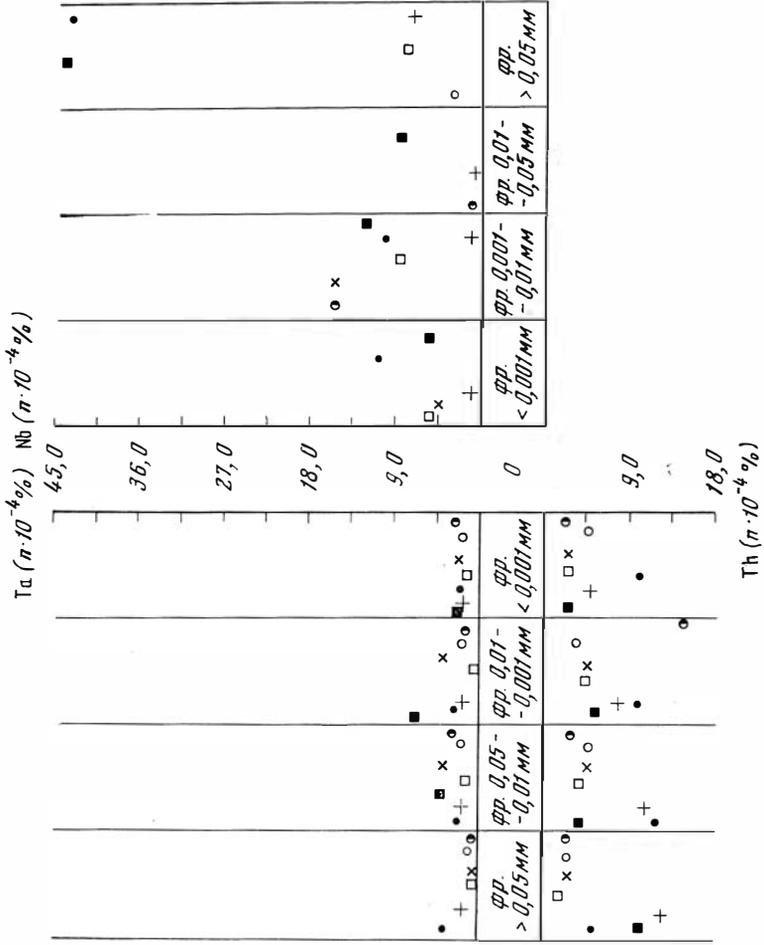
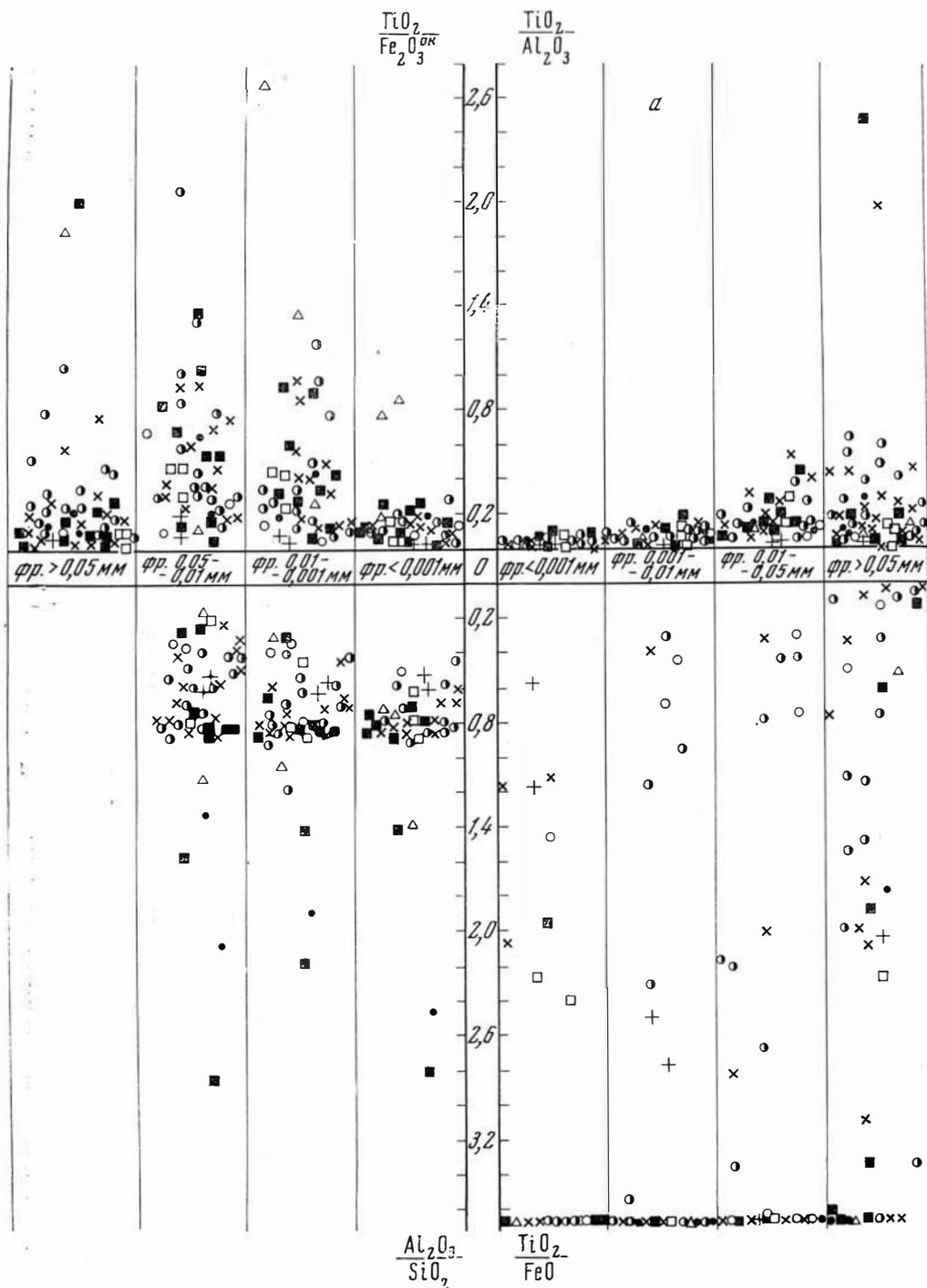


Рис. 22. Содержание  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3^{ок}$ ,  $FeO$ ,  $SiO_2$ ,  $Nb$ ,  $Ta$  и  $Th$  во фракциях из материала коры выветривания, глин и бокситов

Условные обозн. те же, что и на рис. 21

содержания  $Al_2O_3$  во фракции  $<0,001$  мм превышают таковые во фракциях  $0,01-0,05$  мм и  $>0,05$  мм примерно в два раза, за исключением коры выветривания на габбро, где содержания  $Al_2O_3$  в выделенных фракциях изменяются незначительно: от 23,80 до 28,79%. В изученных фракциях  $Al_2O_3$  распределена примерно одинаково, о чем свидетельствуют близкие значения коэффициентов вариации для содержаний этого элемента, лишь несколько возрастающие в песчаных



фракциях  $>0,05$  мм (табл. 18). Во фракциях из материала сидеритизированных горизонтов выветривания  $Al_2O_3$  распределена аналогично вышеописанному. Таким образом, содержания  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  в разных фракциях выветрелого материала распределены различно.

Характер распределения  $Fe_2O_3^{ок}$  по фракциям достаточно близок к описанному для  $TiO_2$ . Средние содержания окисного железа во фракциях  $>0,05$  мм превышают таковые во фракциях  $0,01-0,001$  мм в 2,0—3,5 раза за исключением коры выветривания габбро, где отмеченные различия минимальны (16,71%  $Fe_2O_3^{ок}$  во фракции  $>0,05$  мм и 12,63%  $Fe_2O_3^{ок}$  во фракции  $0,01-0,001$  мм). Как и для  $TiO_2$ , с ростом крупности выветрелого материала коэффициенты вариации для содержания  $Fe_2O_3^{ок}$  возрастают (табл. 18—21). Во фракциях из сидеритизированных горизонтов содержания  $Fe_2O_3^{ок}$ , как правило, в 2—3 раза ниже соответствующих содержаний в тех же фракциях из несидеритизированной коры выветривания.

Содержания  $FeO$  резко возрастают во фракциях  $>0,05$  мм, превышая средние содержания закиси железа во фракциях  $<0,001$  мм в 10—30 раз, за исключением коры выветривания габбро, где средние значения  $FeO$  во фракциях  $0,01-0,05$  мм (0,15%) превышают таковые во фракции  $>0,05$  мм (0,44%) лишь в три раза. Наиболее неравномерно содержания  $FeO$  распределяются во фракциях  $>0,05$  мм; здесь коэффициенты вариации для содержания закисного железа максимальны (табл. 18). На диаграмме распределения содержаний  $FeO$  по фракциям выветрелого ма-

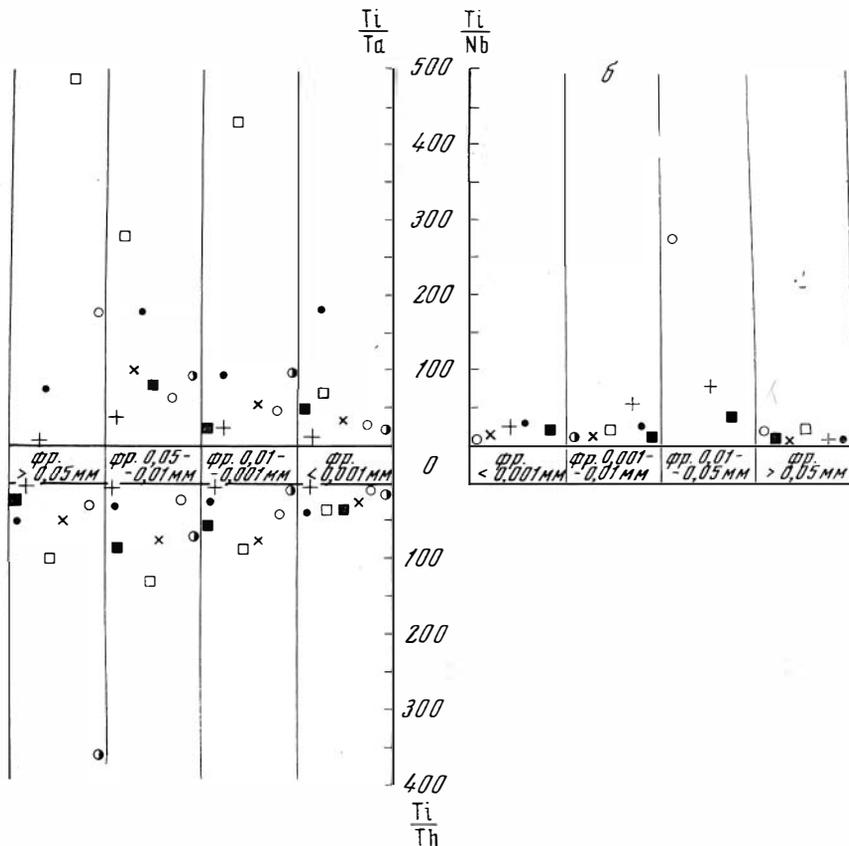


Рис. 23. Значения отношений  
 а— $TiO_2/Al_2O_3$ ,  $TiO_2/Fe_2O_3^{ок}$ ,  $TiO_2/FeO$ ,  $Al_2O_3/SiO_2$ ; б— $Ti/Nb$ ,  $Ti/Ta$  и  $Ti/Th$  во фракциях из материала коры выветривания, глины и бокситов

Условные обозн. те же, что и на рис. 21

**Значения коэффициентов вариации и корреляции для изучаемых окислов (элементов) и**

Объекты исследований	Значения коэффициентов вариации для изучаемых окислов, %						
	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>OK</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
Кора выветривания:							
на амфиболитах	71,0	21,0	55,0	143,0	} 147,0	} 32,0	} 37,0
на известняках	91,0	48,0	57,0	136,0			
на сланцах	71,0	26,0	63,0	—			
Горизонты сидеритизации	38,0	15,0	43,0	57,0	—	—	—

\* Здесь и далее в таблицах данные по коре выветривания в целом.

териала (рис. 22) анализы с повышенным количеством закиси железа характеризуют сидеритизированные горизонты коры выветривания.

Nb в сравнении с Ta и Th в изученных фракциях продуктов выветривания распределены неравномерно. Повышенные содержания Nb устанавливаются во фракции 0,001—0,01 мм (15,38·10<sup>-4</sup>% — проба из коры выветривания на амфиболитах и на известняках), а самое высокое — 28,87·10<sup>-4</sup>% — во фракции >0,05 мм, отобранной из материала коры выветривания на известняках. Ta и Th в выделенных фракциях распределены равномерно. Содержание Ta ни в одной из фракций не превышает 4,5·10<sup>-4</sup>%. Максимальное содержание Th (15·10<sup>-4</sup>%) устанавливается во фракции 0,01—0,001 мм, отобранной из пробы по коре выветривания на амфиболитах. Повышенному содержанию Th в пробе по коре выветривания габбро (11·10<sup>-4</sup>%) соответствуют повышенные содержания этого элемента и в отдельных фракциях этой пробы.

SiO<sub>2</sub> в изученных фракциях распределена равномерно, что подтверждается близкими значениями коэффициентов вариации для содержания двуокиси кремния в них (табл. 18—21).

**Значения коэффициентов вариации и корреляции для изучаемых окислов (элементов) и выветривания**

Объекты исследований	Значения коэффициентов вариации для изучаемых окислов, %						
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>OK</sup>	FeO	Ta	Th
Кора выветривания:							
на амфиболитах	14,0	50,0	22,0	50,0	87,0	} 29,0	} 35,0
на известняках	13,0	55,0	24,0	43,0	95,0		
на сланцах	41,0	66,0	34,0	53,0	66,0		
Горизонты сидеритизации в коре выветривания	10,0	36,0	19,0	12,0	48,0	—	—

Таблица 18

отношений между ними во фракциях  $>0,05$  мм, выделенных из материала коры выветривания

Значения коэффициентов вариации для отношений изучаемых окислов, %						Значения коэффициентов корреляции ( $r$ ) для пар изучаемых окислов					
$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{OK}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{OK}}$	$\text{TiO}_2/\text{FeO}$	Ti/Nb	Ti/Ta	Ti/Th
69,0	90,0	135,0	64,0	128,0	134,0*	+0,25	+0,42	+0,22	+0,83	-0,24	-0,15*
153,0	138,0	127,0				$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$			
						+0,35	+0,46	-0,17			
66,0	50,0	—				$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$			
—	50,0	78,0	—	—	—	+0,57	+0,60	—	—	—	
						$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	—0,25			
						+0,39	+0,64				

2. Величина отношения  $\text{TiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  минимальна во фракциях  $<0,001$  мм и максимальна во фракциях  $>0,05$  мм. Средние значения этого отношения во фракциях  $<0,001$  мм изменяются от 0,01 (кора выветривания на габбро) до 0,04 (кора выветривания на сланцах); во фракциях  $>0,05$  мм — от 0,03 (кора выветривания на габбро) до 0,30 (кора выветривания на известняках). С ростом крупности материала выветривания возрастают коэффициенты вариации для отношения  $\text{TiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  в нем (табл. 18—21).

Отношение  $\text{TiO}_2:\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{OK}}$  во фракциях изменяется так же, как и  $\text{TiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ , с той лишь разницей, что максимальные значения отношения  $\text{TiO}_2:\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{OK}}$  устанавливаются во фракции 0,01—0,05 мм. Во фракциях из горизонтов сидеритизации в связи с пониженным содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{OK}}$  в них величина отношения  $\text{TiO}_2:\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{OK}}$  несколько возрастает. Для отношения  $\text{TiO}_2:\text{FeO}$ , по причине неравномерного распределения содержания FeO в выделенных фракциях, характерны значительные колебания его величин, что также подтверждается большими значениями коэффициентов вариации для этого отношения (табл. 18—21).

Таблица 19

отношений между ними во фракциях 0,05—0,01 мм, выделенных из материала коры

Значения коэффициентов вариации для отношений изучаемых окислов, %						Значения коэффициентов корреляции ( $r$ ) для пар изучаемых окислов					
$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{OK}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	Ti/Ta	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{OK}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	Ti/Ta	Ti/Th
30,0	46,0	86,0	97,0	83,0	81,0	-0,34	+0,46	+0,35	+0,28	+0,39	-0,22
34,0	61,0	77,0	127,0			$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$		
						-0,50	+0,38	+0,20	+0,18		
56,0	50,0	34,0	64,0			$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$		
33,0	46,0	49,0	77,0	-0,93	+0,72	+0,49	+0,35				
				$\pm 0,11$	$\pm 0,08$	$\pm 0,03$	$\pm 0,03$				
				-0,44	+0,50	+0,49	-0,24				

**Значения коэффициентов вариации и корреляции для изучаемых окислов (элементов) коры**

Объекты исследований	Значения коэффициентов вариации для изучаемых окислов, %							
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>OK</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
Кора выветривания: на амфиболитах	12,0	46,0	22,0	52,0	70,0	} 99,0	} 30,0	} 38,0
на известняках	7,0	40,0	17,0	42,0	39,0			
на сланцах	17,0	48,0	13,0	44,0	66,0			
Горизонты сидеритизации в коре выветривания	7,0	26,0	19,0	17,0	40,0	—	—	—

Повышенные содержания FeO во фракциях из сидеритизированных горизонтов уменьшают величины отношения TiO<sub>2</sub> : FeO в них в 7—14 раз в сравнении со средними значениями этого отношения в несидеритизированных участках профилей выветривания.

Отношение Ti : Nb в изученных фракциях в сравнении с отношениями Ti : Ta и Ti : Th изменяется в относительно узком интервале значений, редко превышая величину 75 · 10<sup>2</sup>. Только в единичном случае для фракции 0,01—0,05 мм (кора выветривания на амфиболитах) величина отношения Ti : Nb достигает 275 · 10<sup>2</sup>. Отношения Ti : Ta и Ti : Th в тех же фракциях изменяются значительно, достигая значений 6800 · 10<sup>2</sup>. Учитывая равномерное распределение Ta и Th в выделенных фракциях, следует считать, что значительные изменения величин отношений Ti : Ta и Ti : Th в них связаны с относительно неравномерным распределением титана. Значе-

**Значения коэффициентов вариации и корреляции для изучаемых окислов (элементов) и отношений**

Объекты исследований	Значения коэффициентов вариации для изучаемых окислов, %							
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>OK</sup>	FeO	Nb	Ta	Th
Кора выветривания: на амфиболитах	9,0	39,0	17,0	41,0	62,0	} 85,0	} 28,0	} 33,0
на известняках	7,0	38,0	12,0	32,0	37,0			
на сланцах	13,0	37,0	5,0	34,0	55,0			
Горизонты сидеритизации в коре выветривания	5,0	14,0	12,0	16,0	27,0			

Таблица 20

и отношений между ними во фракциях 0,01—0,001 мм, выделенных из материала выветривания

Значения коэффициентов вариации для отношений изучаемых оксидов, %							Значения коэффициентов корреляции (r) для пар изучаемых оксидов						
$\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{OK}}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	Ti/Nb	Ti-Ta	Ti-Th	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{OK}}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	Ti/Nb	Ti-Ta	Ti/Th
25,0	31,0	70,0	77,0	60,0	80,0	80,0	-0,31 ±0,02	+0,65 ±0,04	+0,28 ±0,02	-0,08 ±0,02	+0,64	-0,14	-0,18
16,0	37,0	55,0	75,0				-0,21 ±0,02	+0,40 ±0,03	+0,19 ±0,01	+0,20 ±0,01			
31,0	33,0	24,0	41,0				-0,96 ±0,08	+0,80 ±0,06	+0,30 ±0,01	+0,30 ±0,02			
21,0	40,0	44,0	59,0	-	-	-	-0,93	+0,59	+0,30	-0,29	-	-	-

ния отношения Nb : Ta в исследованных фракциях продуктов выветривания изменяются значительно: от 2,0 до 20,0. Обратные соотношения между этими элементами устанавливаются во фракциях <0,001 мм; 0,001—0,01 мм и 0,01—0,05 мм из коры выветривания габбро, где отношения Nb : Ta = 0,5. Отмеченные изменения значений отношения Nb : Ta во фракциях связаны главным образом с неравномерным распределением в них ниобия.

Как отмечалось выше,  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  во фракциях распределены относительно равномерно, поэтому величины алюмокремневого модуля ( $Al_2O_3 : SiO_2$ ) в них также изменяются в достаточно узком интервале значений: от 0,2 до 0,9. В более крупных фракциях коэффициенты вариации для алюмокремневого модуля несколько возрастают (табл. 18, 19).

Таблица 21

между ними во фракциях <0,001 мм, выделенных из материала коры выветривания

Значения коэффициентов вариации для отношений изучаемых оксидов, %							Значения коэффициентов корреляции (r) для пар изучаемых оксидов						
$\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{OK}}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	Ti/Nb	Ti-Ta	Ti-Th	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3^{OK}}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	Ti/Nb	Ti-Ta	Ti/Th
20,0	25,0	63,0	69,0	37,0	68,0	58,0	-0,23 ±0,02	+0,78 ±0,04	+0,05 ±0,01	+0,22 ±0,01	+0,85	-0,10	-0,17
14,0	33,0	50,0	68,0				-0,37 ±0,03	+0,60 ±0,05	+0,02 ±0,01	-0,22 ±0,02			
15,0	25,0	17,0	34,0				-0,92 ±0,08	+0,83 ±0,11	+0,20 ±0,01	-0,04 ±0,01			
19,0	40,0	21,0	25,0	-	-	-	-0,87	+0,80	+0,27	+0,26	-	-	-

Таким образом, изменения отношений титана с Al, Nb, Ta, Th, а также  $Fe^{3+}$  и  $Fe^{2+}$  в изученных фракциях отражают характер распределения в них этих элементов.

При характеристике вещественного состава отдельных фракций указывалось, что фракции  $<0,001$  мм из всех исследованных профилей района полиминеральны. Поэтому приведенные в настоящей главе данные по содержанию изученных элементов и отношений между ними в этих фракциях характеризуют смеси глинистых минералов (каолинита, гидрослюда, монтмориллонита) в различных количественных соотношениях. Однако в одной из проб по коре выветривания амфиболитов (линия 1—1; скв. 2262, глубина 51,8—54,0 м) термическим и рентгеноструктурным анализами было установлено присутствие мономинеральной каолиновой фракции  $<0,001$  мм. Данные по содержанию исследуемых элементов и отношениям между ними в каолините, являющемся самым распространенным глинистым минералом в корках выветривания района, таковы:  $TiO_2=0,80\%$ ;  $Al_2O_3=30,31\%$ ;  $Ta=2,45 \cdot 10^{-4}\%$ ;  $Th=3,0 \cdot 10^{-4}\%$ ;  $Fe_2O_3^{ок}=17,89\%$ ;  $FeO=0,14\%$ ;  $SiO_2=36,39\%$ ;  $TiO_2:Al_2O_3=0,02$ ;  $Ti:Ta=19,59 \cdot 10^2$ ;  $Ti:Th=16,6 \cdot 10^2$ ;  $TiO_2:Fe_2O_3^{ок}=0,04$ ;  $TiO_2:FeO=5,71$ ;  $Al_2O_3:SiO_2=0,82$ . Приведенные данные согласуются с результатами исследований А. А. Мигдисова [69].

3. Соотношения титана с другими элементами-гидролизатами, а также с железом в различных фракциях продуктов выветривания, показанные на рисунках 24—29, позволяют отметить следующее. В изученных фракциях корреляционная связь титана с Ta, Th и  $Fe^{2+}$  практически отсутствует, что подтверждается также очень низкими значениями соответствующими

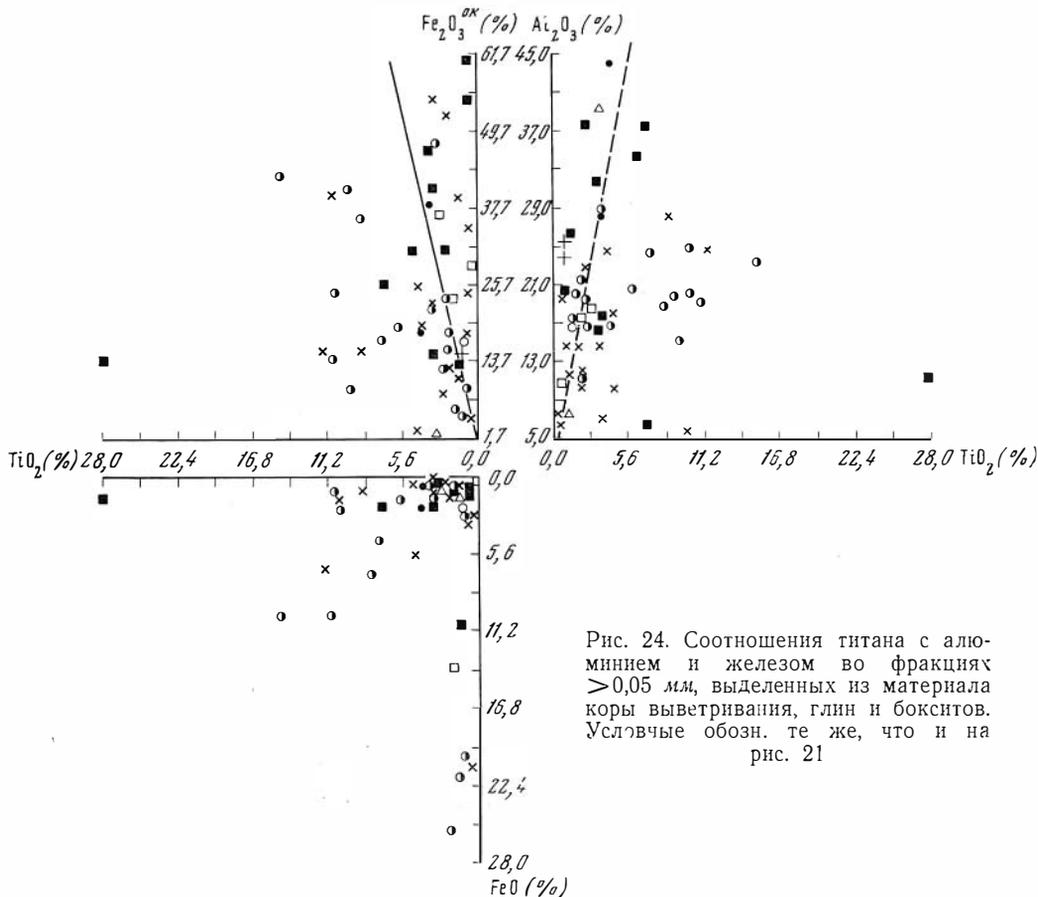


Рис. 24. Соотношения титана с алюминием и железом во фракциях  $>0,05$  мм, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

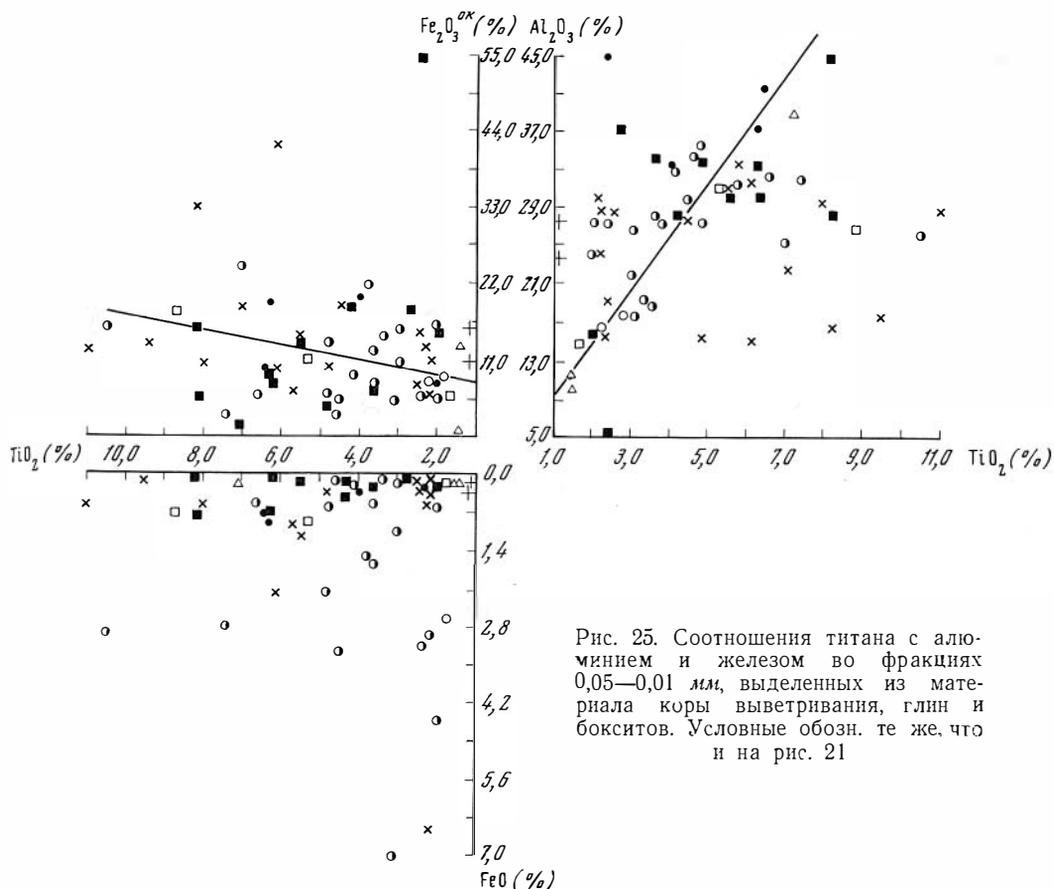


Рис. 25. Соотношения титана с алюминием и железом во фракциях 0,05—0,01 мм, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

ших коэффициентов корреляции (табл. 18—21). В тех же фракциях достаточно определенно устанавливается прямая взаимосвязь  $\text{Ti}$  с  $\text{Al}$ ,  $\text{Nb}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . Степень этой взаимосвязи различна в разных фракциях. Наиболее тесная связь  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  констатируется во фракции  $<0,001$  мм ( $r \text{ TiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$  от +0,60 до +0,83; табл. 21). В более крупных фракциях эта связь ослабевает. Больше всего точек, отклоняющихся от прямой пропорциональной зависимости между  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , устанавливается во фракциях 0,01—0,05 мм и  $>0,05$  мм (рис. 24, 25), где, как отмечалось ранее, концентрируется основная масса минералов титана (ильменита). Прямая пропорциональная зависимость между  $\text{Ti}$  и  $\text{Nb}$  прослеживается во всех изученных фракциях. Взаимосвязь  $\text{TiO}_2$  с  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}$ , в противоположность связи  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , с укрупнением материала возрастает так, что максимальные значения коэффициентов корреляции между  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}$  устанавливаются во фракции  $>0,05$  мм (где  $r \text{ TiO}_2 : \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}$  от +0,42 до +0,60; табл. 18).

Для объяснения описанных соотношений был произведен расчет доли двуокиси титана, связанной с самым распространенным титановым минералом — ильменитом — в изученных фракциях (табл. 22). Этот расчет показал, что с ростом крупности выветрелого материала и содержания ильменита в нем доля  $\text{TiO}_2$ , связанная с этим минералом, возрастает. Максимальное количество  $\text{TiO}_2$ , связанное с ильменитом, устанавливается во фракциях 0,01—0,05 мм (кора выветривания на известняке) и  $>0,05$  мм (кора выветривания на амфиболитах) и в среднем не превышает 60%. Во фракциях 0,01—0,001 мм с ильменитом связано в среднем не более 19,0%  $\text{TiO}_2$ . Во фракции  $<0,001$  мм проведенными работами ти-

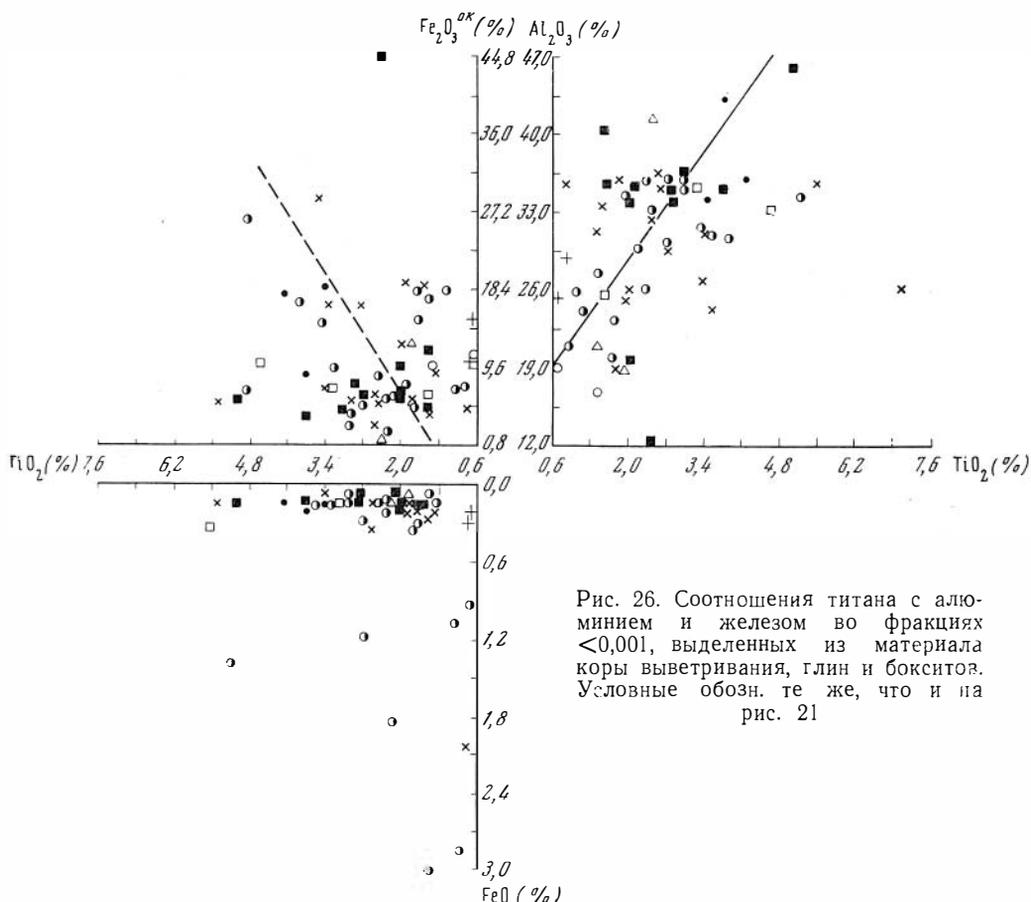


Рис. 26. Соотношения титана с алюминием и железом во фракциях  $< 0,001$ , выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

тановых минералов не обнаружено. Отсутствие таковых в этих фракциях подтверждается также результатами исследований А. Б. Ронова и А. А. Мигдисова [103], А. А. Мигдисова [69], Д. Н. Пачаджанова [84]. Таким образом, следует считать, что во фракциях  $< 0,001$  мм во всех исследованных профилях выветривания района титан и другие элементы-гидролизаты (Al, Nb, Ta, Th) связаны с глинистыми минералами, слагающими эти фракции. Учитывая устойчивое постоянство соотношений между изученными элементами-гидролизатами во фракциях  $< 0,001$  мм, можно полагать, как это делают А. А. Мигдисов [69] и Д. Н. Пачаджанов [84], что их основная масса изоморфно входит в структуру глинистых минералов. И только незначительная часть этих элементов может адсорбироваться или находиться в коллоидной или гидратированной форме [69, 84]. Изоморфная емкость титана в глинистых минералах велика [84], поэтому титан может замещать алюминий в структуре глинистых минералов в значительных количествах, что и обуславливает наличие достаточно прочной связи между  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  в изученных фракциях  $< 0,001$  мм. Как показал Д. Н. Пачаджанов [84], в гипергенных процессах титан наиболее тесно связан с ниобием, а не с танталом. По-видимому, поэтому во фракциях  $< 0,001$  мм констатируется прямая пропорциональная зависимость между Ti и Nb и отсутствие таковой между Ti и Ta. Возможно, что по этой причине в тех же глинистых фракциях отсутствует связь Ti с Th. В более крупных фракциях значительная доля двуокиси титана связана с ильменитом и частично с рутилом. Этим обстоятельством нужно объяснить значительное ослабление связи титана с алюминием и почти полное отсутствие таковой между Ti и Ta, Ti и Th. Следует считать что, как и в

коренных породах, ильменит (а также рутил) является концентратом не только титана, но и ниобия. Это убедительно подтверждается существованием прямо пропорциональной зависимости между Ti и Nb в самых крупных из выделенных фракций (0,01—0,05 мм и >0,05 мм), где, как отмечалось, взаимосвязь титана с другими элементами-гидролизатами либо значительно ослаблена (с Al), либо отсутствует совсем (с Ta и Th). Усиление взаимосвязи  $TiO_2$  с  $Fe_2O_3^{ок}$  в материале крупных фракций, содержащих значительное (до 80—90%, табл. 10) количество гидроокислов железа (лимонита), хорошо согласуется с результатами исследований М. В. Пастуховой, которая также установила тесную связь этих элементов в крупных фракциях продуктов выветривания, предполагая при этом возможный широко проявленный изоморфизм между  $Ti^{4+}$  и  $Fe^{3+}$  в структуре железистых минералов [83].

Для выяснения форм нахождения исследуемых элементов в изученных фракциях был произведен расчет количеств (выходов)  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3^{ок}$ , FeO, Nb, Ta и Th, связанных с выделенными фракциями, и проанализированы соотношения выходов указанных элементов с выходами соответствующих фракций. Графически эти соотношения изображены на диаграммах (рис. 30—36).

При анализе этих диаграмм учитывались следующие положения. Если исследуемый элемент входит изоморфно в структуру минеральных компонентов (глинистых минералов, выветрелых породообразующих минералов коренных пород), слагающих материал фракции, то между выходом (количеством) этого элемента в данной фракции и выходом самой фракции должна существовать прямая пропорциональная зависимость. Отсутствие такой зависимости или ее ослабление должно свидетельствовать

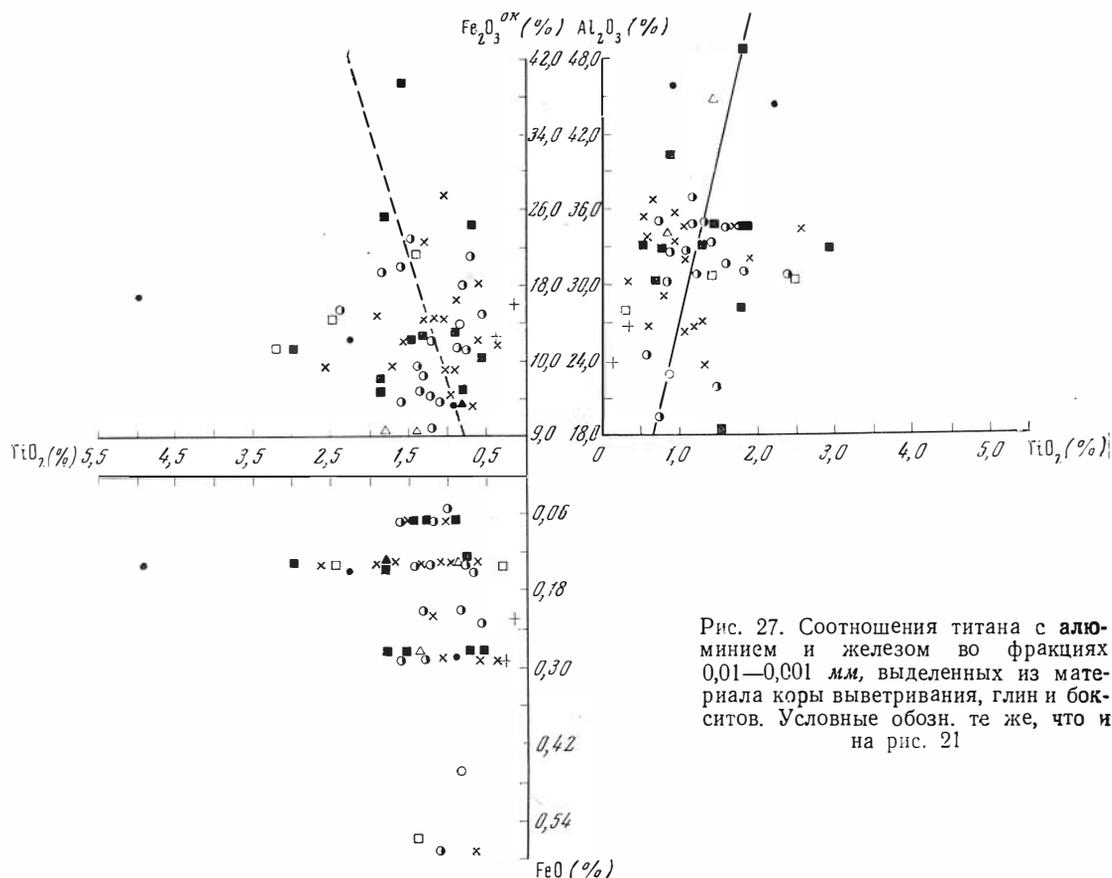


Рис. 27. Соотношения титана с алюминием и железом во фракциях 0,01—0,001 мм, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

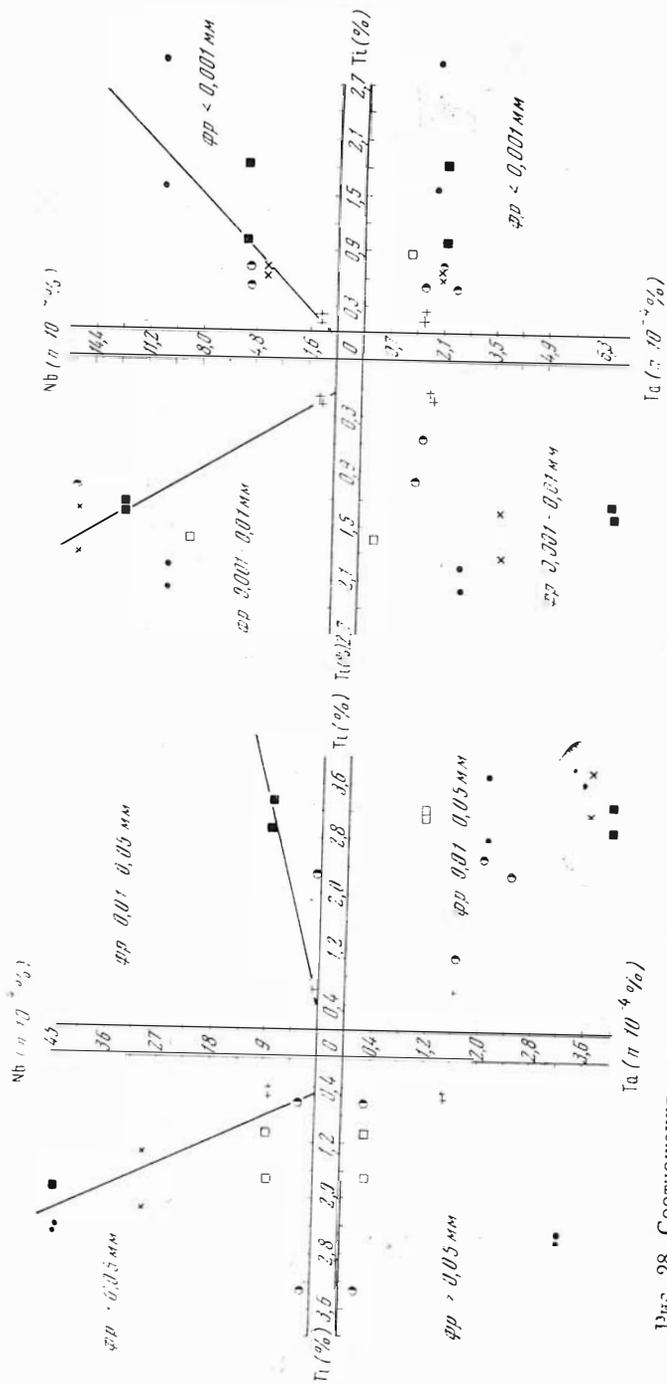


Рис. 28. Соотношения титана с ниобием и танталом во фракциях, выделенных из материала коры выветривания глины и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

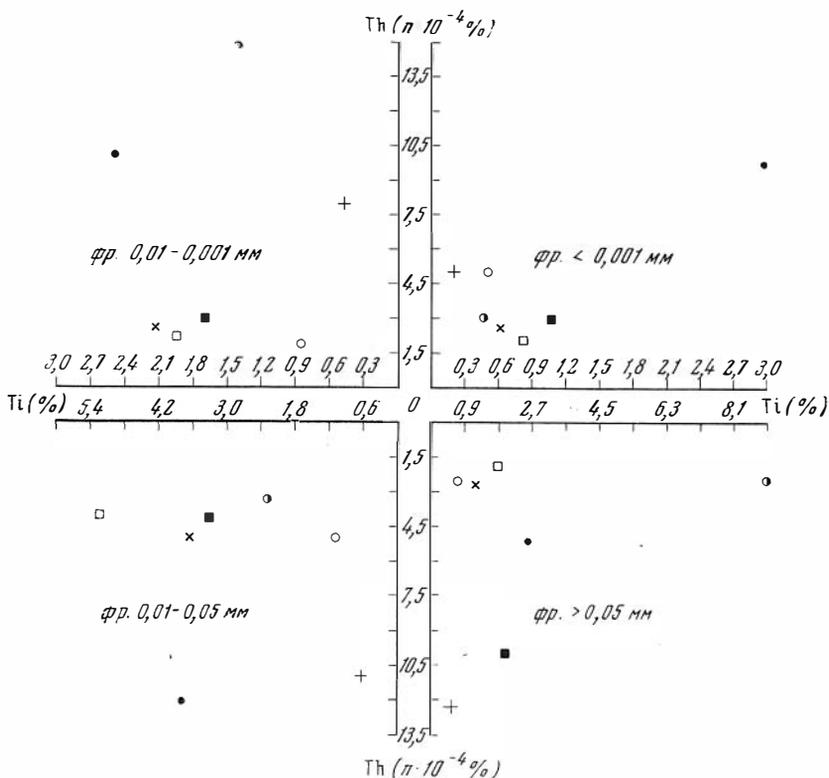


Рис. 29. Соотношения титана с торием во фракциях, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

о том, что рассматриваемый элемент либо концентрируется в собственной минеральной форме, либо незакономерно рассеивается в материале фракции. Анализируя представленные соотношения с точки зрения изложенных положений, отметим следующее.

1. В исследованных профилях выветривания района между выходом выделенных фракций и количеством (выходом)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Та и Тh в них устанавливается прямая пропорциональная зависимость. Наиболее четко эта зависимость проявлена для  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Таким образом, во всех фракциях продуктов выветривания алюминий, тантал и торий входят главным образом в структуру глинистых и в различной степени выветрелых породообразующих минералов.

2. Для  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}$  и Nb прямая пропорциональная зависимость достаточно определенно устанавливается только между выходом этих элементов и выходом самых мелких фракций: глинистой  $< 0,001$  мм и крупноалевритовой 0,001—0,01 мм. В более крупных фракциях эта зависимость ослабевает и наименее выражена во фракции  $> 0,05$  мм. Таким образом, титан, окисное железо и ниобий входят в структуру глинистых минералов, слагающих мелкие фракции ( $< 0,001$  мм и 0,001—0,01 мм). В более крупных фракциях (0,01—0,05 мм и  $> 0,05$  мм) титан и железо в значительной степени концентрируются в собственной минеральной форме, а ниобий главным образом в ильмените. Минералогические исследования подтверждают наличие повышенных количеств ильменита и лимонита именно во фракциях 0,01—0,05 мм и  $> 0,05$  мм (табл. 10), а соответствующие расчеты показывают, что, например, с ильменитом в этих фракциях может быть связано в среднем до 60%  $\text{TiO}_2$  (табл. 22).

Прямая пропорциональная зависимость между выходом фракций и выходом FeO в них почти или полностью отсутствует. Это свидетельст-

Таблица 22

Расчет доли  $TiO_2$ , связанной с ильменитом во фракциях из коры выветривания на изученных участках

Кора выветривания и фракция из нее, мм	Число изученных проб	Среднее содержание ильменита* во фракциях вес. %	Содержание $TiO_2$ в ильмените**, вес. %	Количество $TiO_2$ в минерале, приходящееся на 1 г материала фракций, мг	Процент $TiO_2$ , приходящийся на ильменит во фракциях	Среднее содержание $TiO_2$ * во фракциях	
						мг/г	%
Неперетложенная на амфиболитах							
0,001—0,01	3	0,7	52,66	3,68	17,0	12,0	1,20
0,01—0,05	5	2,0	52,66	10,52	40,0	27,2	2,72
>0,05	3	1,0	52,66	5,26	50,0	12,5	1,25
Перетложенная на амфиболитах							
0,001—0,1	17	0,5	52,66	2,63	12,0	22,9	2,29
0,01—0,05	17	3,2	52,66	16,84	40,0	42,1	4,21
>0,05	17	6,3	52,66	33,30	60,0	55,5	5,55
На известняках							
0,001—0,01	20	1,0	52,66	5,26	19,0	27,7	2,77
0,01—0,05	20	6,0	52,66	31,98	60,0	53,3	5,33
>0,05	20	2,0	52,66	11,10	30,0	37,0	3,70
На сланцах							
0,001—0,01	5	0,4	52,66	2,50	8,0	31,3	3,13
0,01—0,05	5	3,0	52,66	15,75	30,0	52,5	5,25
>0,05	5	0,15	52,66	0,79	4,5	17,7	1,77
На габбро							
0,001—0,01	3	0,02	52,66	0,10	1,5	6,8	0,68
0,01—0,05	3	0,08	52,66	0,40	4,0	10,2	1,02
>0,05	3	0,04	52,66	0,20	2,5	8,2	0,82

\* Среднее содержание ильменита во фракциях заимствовано из табл. 10, а среднее содержание  $TiO_2$ — из табл. 16. \*\* Содержание  $TiO_2$  в ильмените теоретическое.

вует, вероятно, о незакономерном распределении  $FeO$  в материале изученных фракций. Как отмечалось выше, концентрация  $FeO$  устанавливается только в сидеритизированных горизонтах коры выветривания главным образом в форме сидерита.

Таким образом, разделение материала коры выветривания на отдельные фракции, изучение распределения и соотношений между исследуемыми элементами в них в значительной мере помогают понять поведение этих элементов в процессе выветривания коренных пород и установить формы их нахождения в продуктах этого процесса.

### Основные выводы

1. В коре выветривания района соотношения титана с другими элементами-гидролизатами ( $Al$ ,  $Nb$ ,  $Ta$ ,  $Th$ ), а также железом, установленные в коренных породах, наследуются и изменяются. Эти изменения связаны с различной устойчивостью минералов коренных пород в процессе их выветривания (гидролиза). Выветривание коренных пород упрощает схему распределения исследуемых элементов в выветрелых продуктах. Если в коренных породах эти элементы определенным образом концентрировались в трех группах минералов: фемических, салических, аксессуарных и рудных, то в продуктах выветривания они распределяются в двух минеральных группах: в глинистых минералах и минералах рудных (главным образом в ильмените и гидроокислах железа).

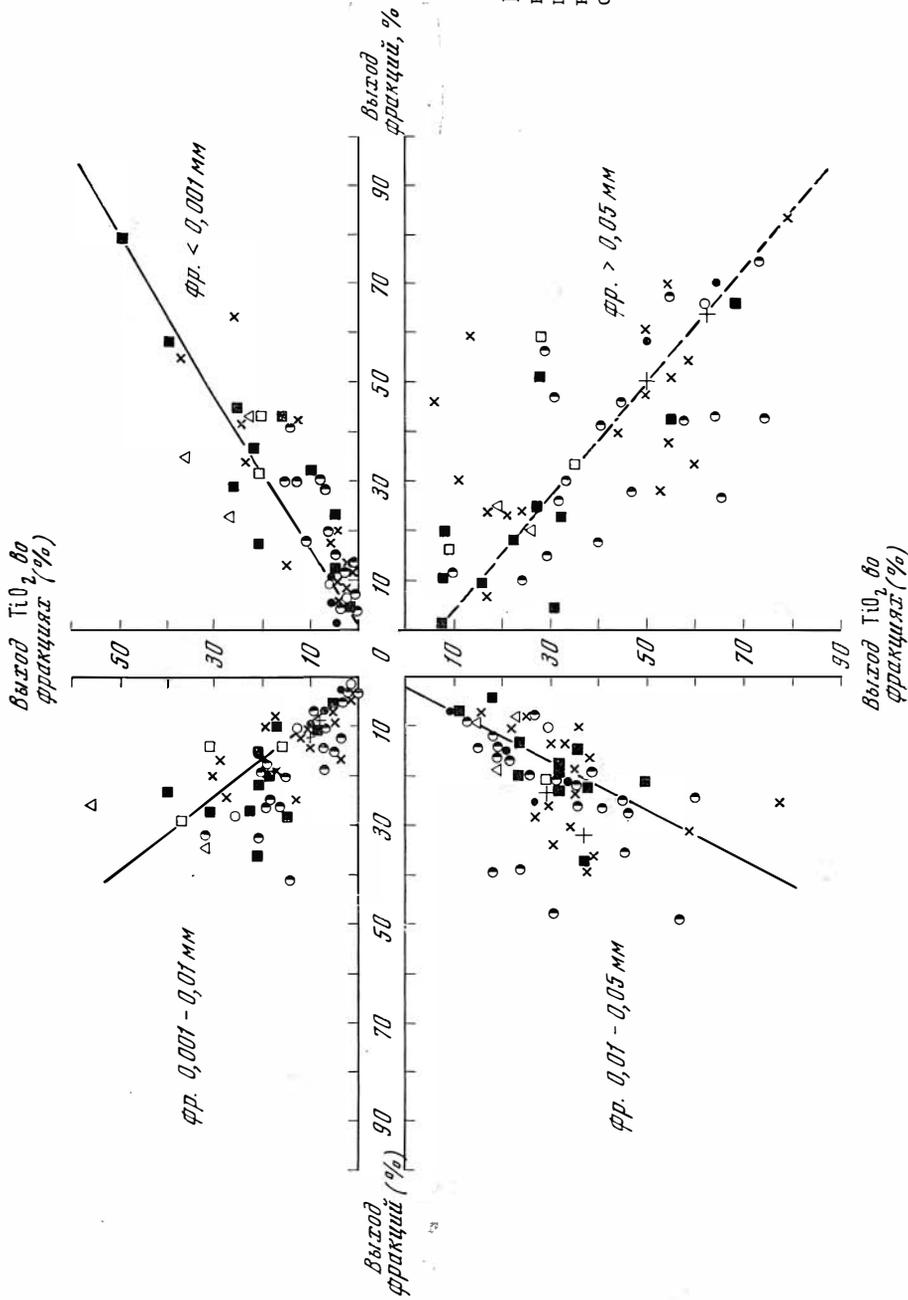


Рис. 30. Соотношения между выходом  $TiO_2$  и выходом фракций, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

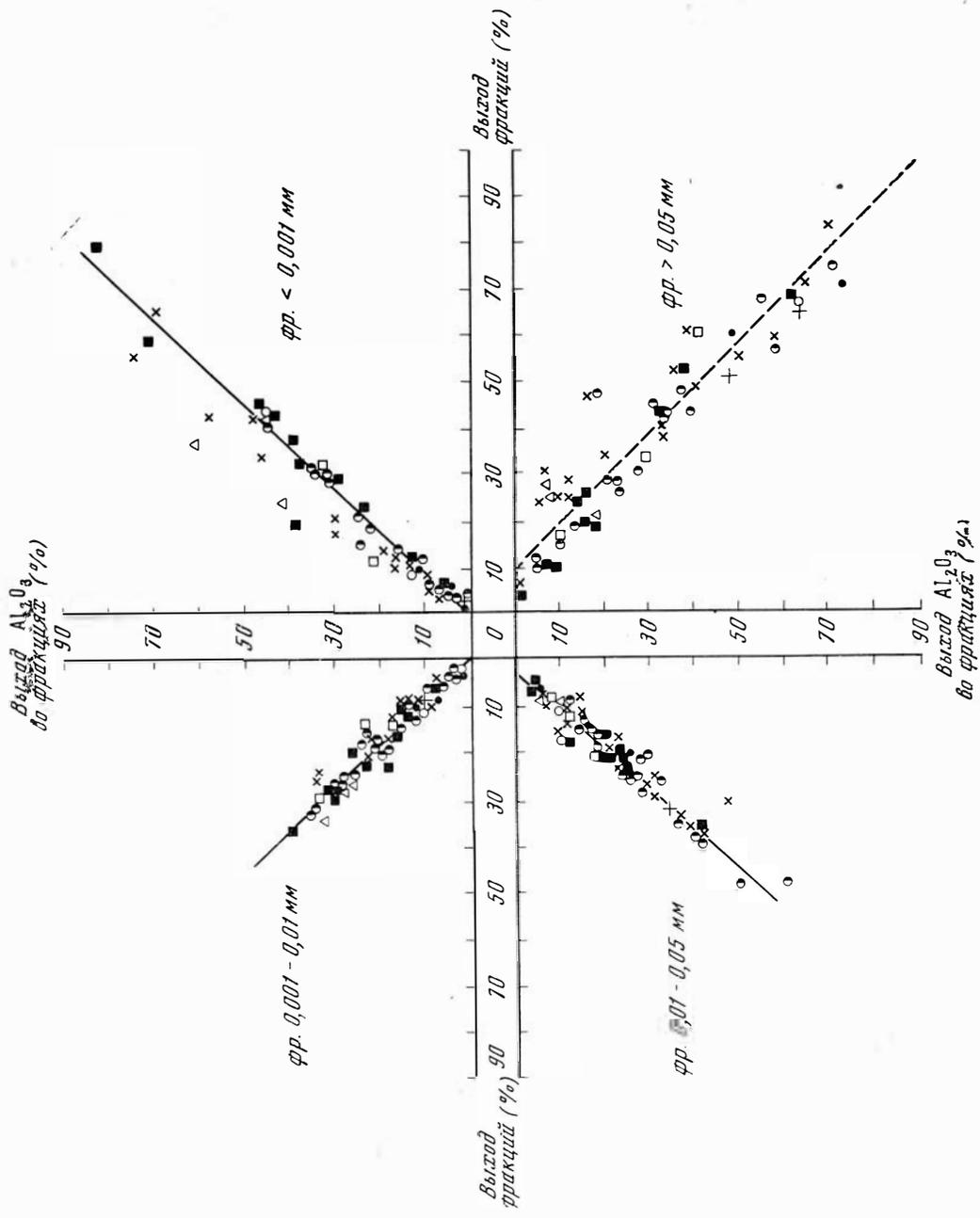


Рис. 31. Соотношения между выходом  $Al_2O_3$  и выходом фракций, выделенных из матернала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

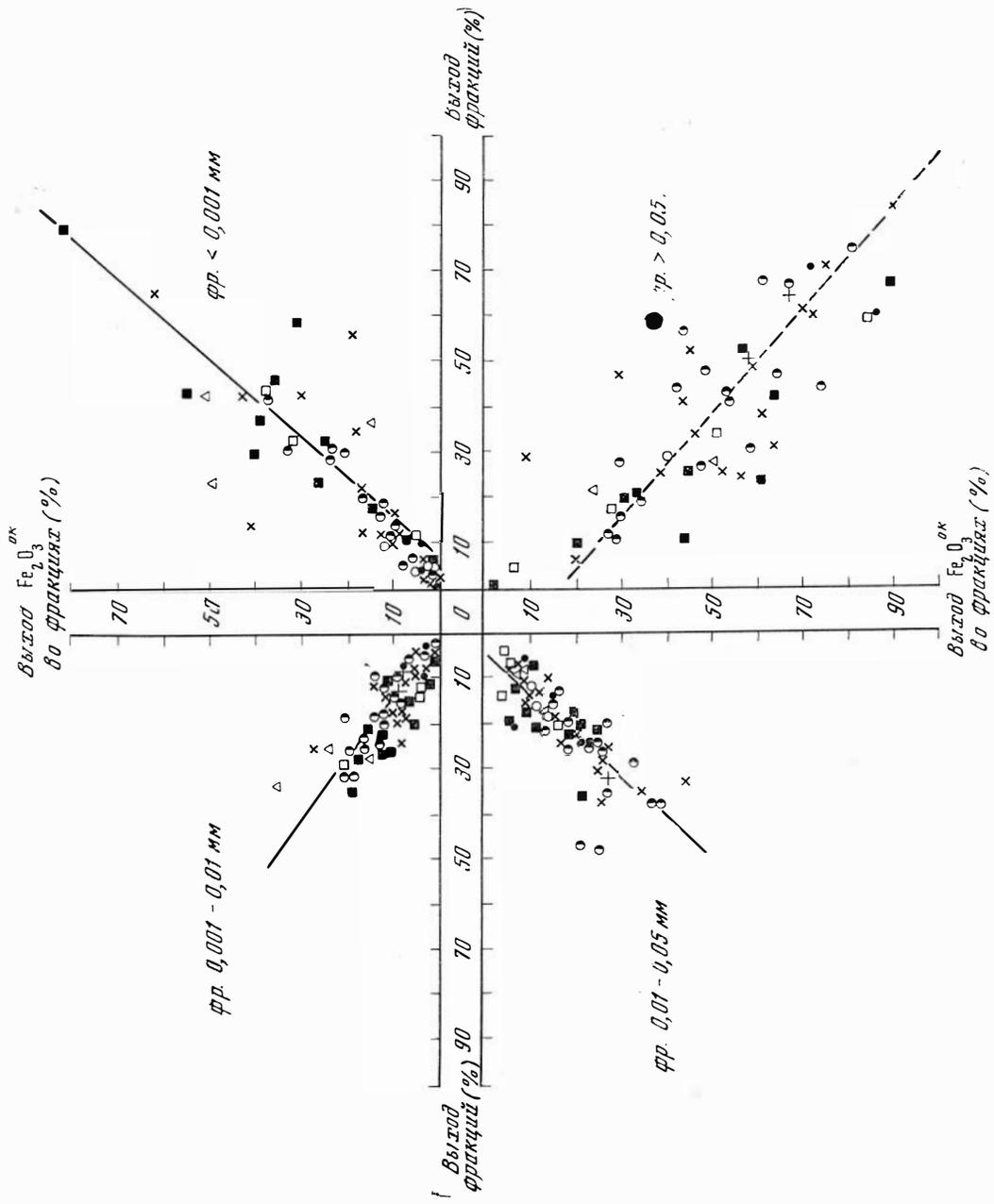


Рис. 32. Соотношения между выходом  $Fe_2O_3^{ок}$  и выходом фракций, выделенных из матриала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

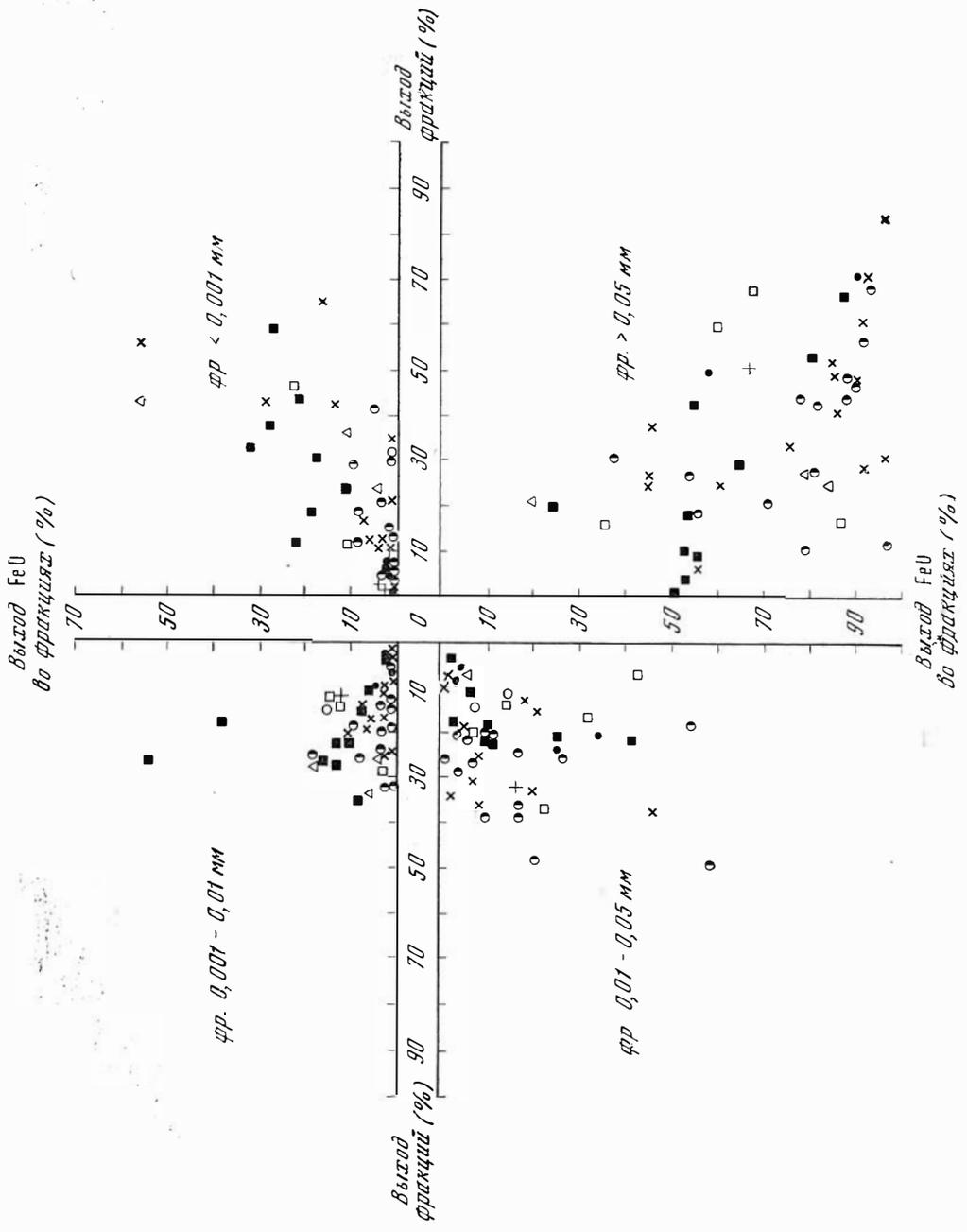


Рис. 33. Соотношения между выходом FeO и выходом фракций, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

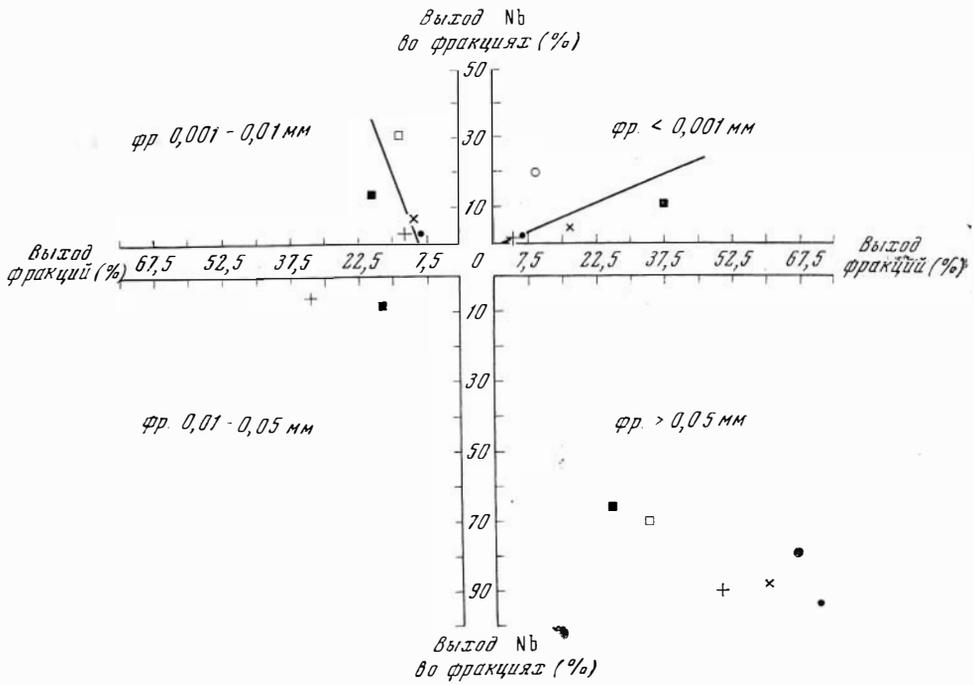


Рис. 34. Соотношения между выходом ниобия и выходом фракций, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21.

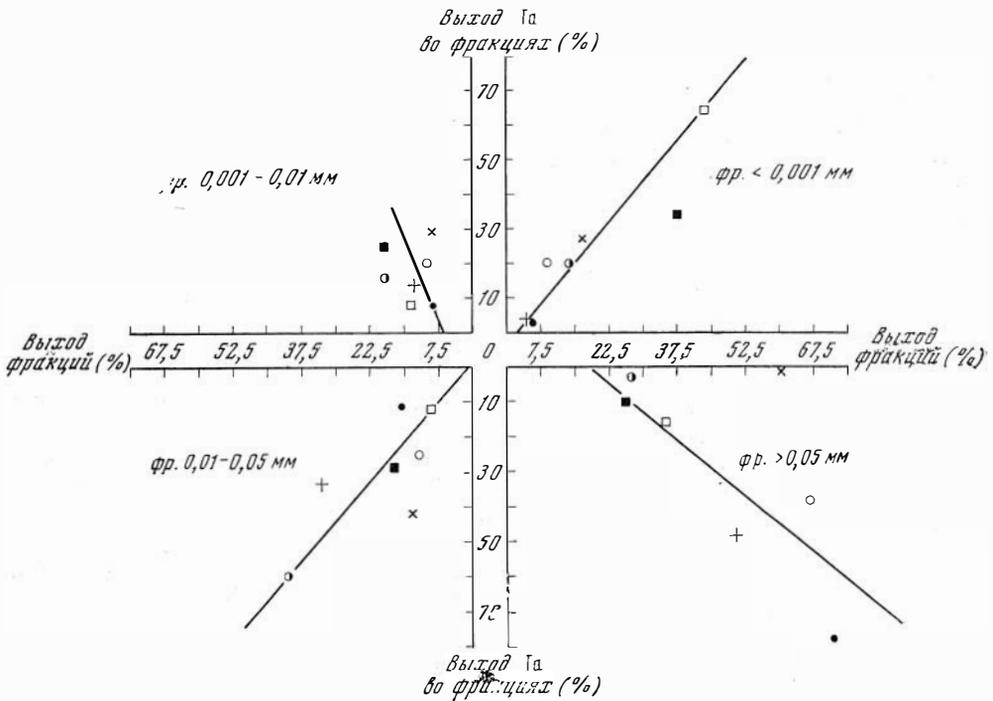


Рис. 35. Соотношения между выходом тантала и выходом фракций, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21.

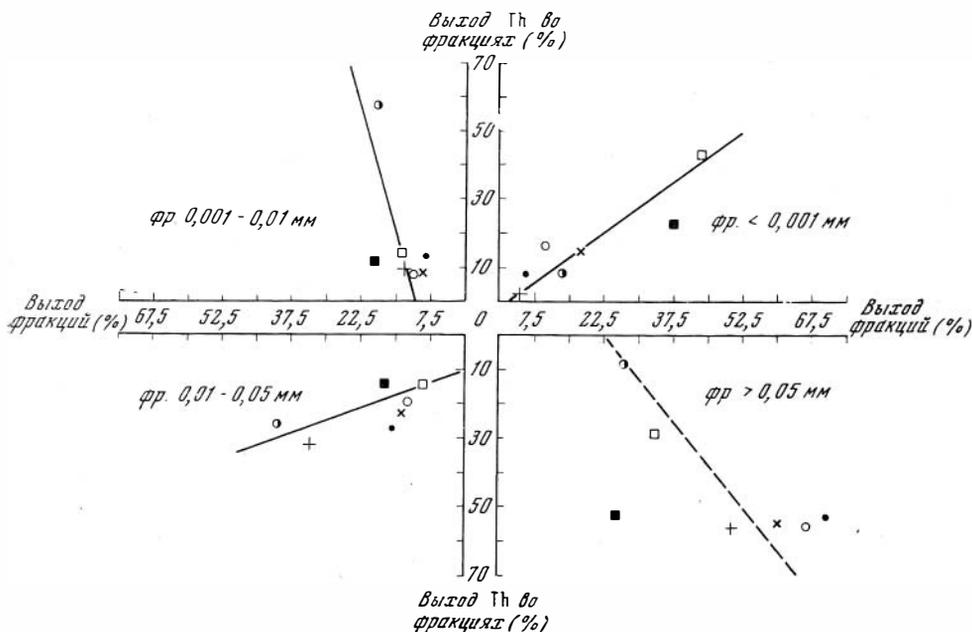


Рис. 36. Соотношения между выходом тория и выходом фракций, выделенных из материала коры выветривания, глин и бокситов. Условные обозн. те же, что и на рис. 21

2. Изучение распределения исследуемых элементов и их соотношений в коре выветривания и в ее отдельных фракциях устанавливает различные формы нахождения этих элементов в выветрелых продуктах. Al, Ta и Th входят главным образом в структуру глинистых минералов. Ti, Nb и  $Fe^{3+}$  связаны с глинистыми минералами только в мелких (0,01—0,001 мм и <0,001 мм) фракциях коры выветривания. В более крупном материале выветривания Ti и  $Fe^{3+}$  концентрируются в собственных минералах: главным образом ильмените, реже рутиле (Ti) и гидроокислах железа ( $Fe^{3+}$ ). Nb, как и в коренных породах, связан в основном с ильменитом.

3. В коре выветривания в сравнении с коренными породами происходит снижение роли минералов титана как главных концентраторов этого элемента. Если в коренных породах с этими минералами было связано до 70—90% общего количества  $TiO_2$ , то в коре выветривания на их долю (главным образом на ильменит) приходится в среднем не более 40%  $TiO_2$ . Это связано с разрушением при выветривании темноцветных и неустойчивых титановых (сфена) минералов, поставляющих значительное количество титана и обогащающих этим элементом тонкодисперсную (глинистую) часть коры выветривания.

4. Присутствие титана в значительных количествах в собственной минеральной форме (главным образом как ильменит) существенно влияет на характер соотношений этого элемента с другими элементами-гидролизатами в коре выветривания. Поэтому в изученных профилях выветривания значительно ослаблена связь Ti с Al, а такая же Ta и Th отсутствует совсем. Четко прослеживаемая связь Ti с Nb, которая наследуется от коренных пород, объясняется вхождением последнего в структуру самого распространенного титанового минерала — ильменита. В коре выветривания достаточно определенно устанавливается также взаимосвязь титана с другим широко распространенным элементом — железом. Таким образом, на характер распределения титана в коре выветривания существенное влияние могут оказывать не только элементы-гидролизаты, но и железо.

5. В бурых железняках и горизонтах сидеритизации, генетически связанных со вторичными наложенными процессами, содержание  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  в сравнении с другими горизонтами выветривания понижается. Существенного разделения этих элементов в отмеченных образованиях коры выветривания не происходит. В них значительно изменяются содержания закисного и окисного железа, меняющие отношения  $FeO$  и  $Fe_2O_3^{ок}$  с  $TiO_2$ . В бурых железняках Nb, Ta и Th содержатся в тех же количествах и распределены так же, как и в других горизонтах выветривания.

6. В коре выветривания габбро, практически лишенном минералов титана, отмечается низкое ( $<1,0\%$ ) содержание  $TiO_2$  и пониженное (в сравнении с профилями выветривания на других породах) количество ниобия. В продуктах выветривания этих пород и в ее отдельных фракциях изучаемые элементы распределены равномерно. Характерными особенностями этого профиля выветривания, связанными, по-видимому, с характером распределения элементов-гидролизатов в неизмененных габбро, являются повышенное содержание тория ( $11,0 \cdot 10^{-4}\%$ ) и преобладание тантала над ниобием во фракциях  $<0,001$  мм;  $0,001-0,01$  мм и  $0,01-0,05$  мм, где отношение Nb : Ta = 0,5.

## Глава VII

### ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТИТАНА В ПРОДУКТАХ ПЕРЕОТЛОЖЕНИЯ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ — БОКСИТАХ И ГЛИНАХ

#### Гранулометрия продуктов переотложения коры выветривания и вещественный состав их отдельных фракций

Результаты гранулометрических анализов рыхлых бокситов (4 пробы) и глинистых бокситов (1 проба), а также пестроцветных (11 проб) и огнеупорных (3 пробы) глин приведены на диаграмме (рис. 17) <sup>1</sup>. Из диаграммы следует, что бокситы представляют собой обломочные породы. Они на 60—90% сложены материалом крупнее 0,05 мм. В пробе из глинистых бокситов количество фракций  $>0,05$  мм не превышает 20%. Пестроцветные и огнеупорные глины главным образом (до 99%) сложены алевролитовым (0,05—0,001 мм) и глинистым ( $<0,001$  мм) материалом. Содержание фракций  $>0,05$  мм в этих глинах обычно не превышает 20—30%. В единичных пробах из пестроцветных глин, имеющих значительное количество бурых железистых оолитин и являющихся по существу бокситизированными глинами, содержание фракции  $>0,05$  мм достигает 50—70%. Обломочный характер исследованных бокситов также убедительно подтверждается детальными исследованиями их структурных особенностей [58].

Количественно-минералогический состав фракций, выделенных из продуктов переотложения коры выветривания района, приведен в табл. 23. Крупнозернистые ( $>2,0$  мм;  $2,0-1,0$  мм;  $1,0-0,5$  мм) фракции из бокситов сложены главным образом (на 90—100%) обломками этих пород и в значительно меньшей мере (до 5—9%) — оолитами, состоящими из лимонита, гематита, магнетита, ильменита, маггемита. Кварц и полевой шпат присутствуют обычно в редких зернах. В тех же фракциях из глин присутствуют в основном (до 97%) обломки коренных пород и минералов, обычно сильно обохренные и часто разложенные до состояния глины.

<sup>1</sup> Условия построения диаграммы изложены в главе VI.

Количественно-минералогический состав фракций из продуктов переотложения коры выветривания (бокситов, глины)

Продукты переотложения коры выветривания	Число изученных проб	Фракция > 2,0 мм			Фракция 2,0—1,0 мм			Фракция 1,0—0,5 мм		
		Состав фракции	Содержание во фракции, %		Состав фракции	Содержание во фракции, %		Состав фракции	Содержание во фракции, %	
			пределы колебаний	среднее		пределы колебаний	среднее		пределы колебаний	среднее
Бокситы	7	1. Обломки боксита	90—100	97	1. Обломки боксита	90—98	93	1. Обломки боксита	80—95	92
		2. Оолиты (лимонит, гематит, магнетит, ильменит, магнетит)	(—)—5	3	2. Оолиты 3. Кварц	1—8 (—)—(+)	6 +	2. Оолиты 3. Кварц 4. Выветрелый полевой шпат	1—9 (+)-2 (-)-(+)	6 0,5 +
Отлеупорные глины	5	1. Обохренные глинистые обломки	90—99	95	1. Обохренные глинистые обломки	85—97	94	1. Обохренные глинистые обломки	70—95	87
		2. Лимонит 3. Кварц	1—5 (+)-1	3 +	2. Лимонит 3. Кварц	2—7 (+)-3	5 1	2. Лимонит 3. Кварц	5—15 (+)-3	10 1
Пестроцветные глины	15	1. Ожелезненные обломки пород и минералов	40—90	65	1. Ожелезненные обломки пород и минералов	30—70	50	1. Ожелезненные обломки пород и минералов	20—60	45
		2. Оолиты (лимонит, гематит, магнетит, ильменит)	10—50	30	2. Оолиты	20—60	40	2. Оолиты	20—60	40
		3. Лимонит 4. Кварц	1—5 (-)-(+)	3 +	3. Лимонит 4. Кварц	3—10 (-)-(+)	5 +	3. Лимонит 4. Кварц	5—15 (+)-3	10 1

Т а б л и ц а 23 (продолжение)

Продукты переотложения коры выветривания	Число изученных проб	Фракция 0,5—0,25 мм		Фракция 0,25—0,10 мм		Фракция 0,10—0,05 мм			
		Состав фракции		Состав фракции		Состав фракции			
		пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее	пределы колебаний	среднее		
Бокситы	7	1. Обломки бокситов	60—90	85	40—90	45	1. Обломки бокситов	35—80	55
		2. Оолиты	1—9	5	5—60	40	2. Оолиты	5—50	30
		3. Лимонит	(+)-8	5	1—10	7	3. Лимонит	1—20	5
		4. Кварц	(+)-3	1	1—5	3	4. Кварц	0,5—3	1
		5. Выветрелый полевоый шпат	(+)-3	1	1—5	3	5. Выветрелый полевоый шпат	1—8	5
		6. Ильменит	(-)-(+)	+	(+)-2	0,5	6. Ильменит	0,5—8	6,0
					(-)-(+)	+	7. Рутыл	(+)-2	0,3
Огнеупорные глины	5	1. Обоженные глинистые обломки	70—90	80	60—90	70	8. Каолинит	0,5—4	2
		2. Лимонит	5—20	15	40—30	20	9. Гидраргиллит	(-)-2	1
		3. Кварц	1—10	5	5—15	7	10. Циркон	(-)-(+)	+
		4. Ильменит	(-)-(+)	+	(+)-1	+	1. Обоженные обломки глинистые обломки	20—80	65
Пестроцветные глины	15	1. Обоженные обломки пород и минералов	10—50	35	10—50	45	2. Лимонит	10—50	30
		2. Оолиты	20—70	45	20—40	20	3. Кварц	1—5	3
		3. Лимонит	10—20	15	10—30	30	4. Ильменит	(+)-0,8	0,5
		4. Кварц	1—5	3	1—5	+	5. Рутыл	(+)-0,5	0,3
		5. Ильменит	(-)-(+)	+	(+)-1	+	6. Циркон	(+)-1	+
						7. Каолинит	(1)-3	1	
						1. Обоженные обломки пород и минералов	10—40	30	
						2. Оолиты	20—30	15	
						3. Лимонит	20—60	50	
						4. Кварц	(+)-3	1	
						5. Ильменит	(+)-3,6	1,8	
						6. Рутыл	(+)-2	1	
						7. Циркон	(+)-(+)	+	
						8. Каолинит	1—5	3	

Т а б л и ц а 23 (окончание)

Продукты переотложения коры выветривания	Число изученных проб	Фракция 0,05—0,01 м		Фракция 0,01—0,001 мм		Фракция < 0,001 мм				
		Состав фракции	Содержание во фракции, %		Состав фракции	Содержание во фракции, %		Состав фракции		
			пределы колебаний	среднее		пределы колебаний	среднее		пределы колебаний	среднее
Бокситы	7	1. Обломки бокситов	20—60	35	1. Обломки бокситов	(+)-3	1	1. Гидраргиллит	60—90	80
		2. Оолиты	10—40	30	2. Оолиты	1—5	3	2. Каолинит	10—30	20
		3. Лимонит	10—40	20	3. Лимонит	(+)-5	3			
		4. Кварц	(+)-2	1	4. Кварц	(-)-(+)	+			
		5. Выветрелый полевой шпат	1—5	3	5. Ильменит	(+)-1	0,5			
		6. Ильменит	(+)-5	3	6. Рутил	(+)-(+)	+			
		7. Рутил	(+)-1	0,5	7. Каолинит	10—50	30			
		8. Каолинит	1—10	5	8. Гидраргиллит	20—80	60			
		9. Гидраргиллит	1—5	3						
		10. Циркон	(-)-(+)	+						
Огнеупорные глины	5	1. Обоженные глинистые обл.	40—80	60	1. Обоженные глинистые обл.	10—50	30	1. Каолинит	70—90	80
		2. Лимонит	20—50	35	2. Лимонит	10—30	20	2. Гидраргиллит	10—30	20
		3. Кварц	1—10	5	3. Кварц	1—5	3			
		4. Ильменит	(+)-3,6	4,8	4. Ильменит	(+)-0,5	0,3			
		5. Рутил	(+)-1,0	0,7	5. Циркон	(-)-(+)	+			
		6. Циркон	(+)-(+)	+	6. Каолинит	20—60	40			
		7. Каолинит	1—5	3	7. Гидраргиллит	(-)-10	5			
		8. Обоженные обломки пород и минералов	5—25	18	1. Оолиты	20—60	40	1. Каолинит	50—90	75
		9. Лимонит	40—30	45	2. Лимонит	30—70	45	2. Гидраргиллит	15—40	25
		10. Кварц	(+)-3	57	3. Кварц	(+)-(+)	+			
Пестроцветные глины	15	1. Ильменит	(+)-3,6	4,8	4. Ильменит	(+)-0,5	0,3			
		2. Рутил	(+)-1,0	0,7	5. Каолинит	5—20	10			
		3. Циркон	(+)-(+)	+	6. Гидраргиллит	1—10	5			
		4. Каолинит	1—10	5						
		5. Гидраргиллит	1—3	1						

Примечание. Плюс — минерал в редких зернах, минус — минерал отсутствует.

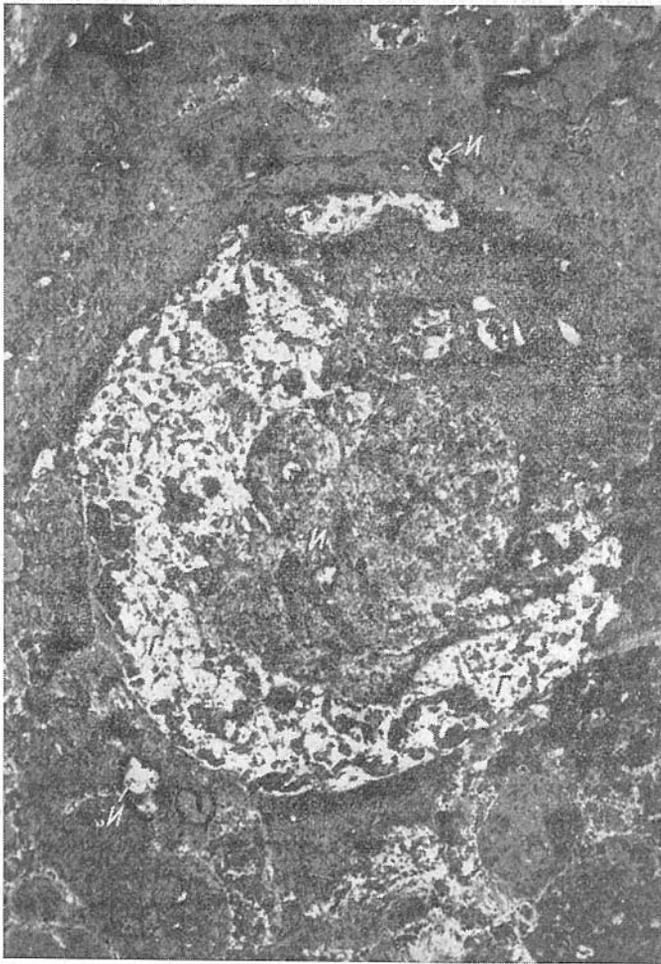


Рис. 37. Неправильная форма зерен ильменита (И) в бобовине (центр снимка) и основной массе боксита. Г — гематит. Аншлиф. Николи скрещены. Увел. 100

В некоторых пробах из бокситизированных пестроцветных глин содержание оолитов возрастает до 60%. Количество лимонита обычно не превышает 15%, а кварц чаще всего присутствует в редких зернах. Как и в коре выветривания, в более мелкозернистых фракциях из переотложенных продуктов (исключая фракцию  $<0,001$  мм) минералогический состав становится разнообразнее. Самыми полиминеральными являются фракции 0,10—0,05 и 0,05—0,01 мм. С уменьшением крупности переотложенных продуктов в них уменьшается содержание обломков бокситового материала (в бокситах), ожелезненных обломков коренных пород и минералов (в пестроцветных и огнеупорных глинах). Одновременно повышается количество оолитов до 50—60% в бокситах (фракции 0,25—0,10 и 0,10—0,05 мм) и лимонита до 60—70% в пестроцветных и огнеупорных глинах (фракции 0,10—0,05; 0,05—0,01 и 0,01—0,001 мм). Повышенное содержание титановых минералов так же, как и в коре выветривания, устанавливаются во фракциях  $>0,05$  и 0,05—0,01 мм, что свидетельствует об унаследовании размера зерен этих минералов в продуктах переотложения от таковых из коры выветривания. Количество кварца и выветрелого полевого шпата обычно не превышает 5—8%. Циркон присутствует обычно в редких зернах. В составе фракций 0,01—0,001 мм значительную роль играют каолинит и гидраргиллит, причем последний более распрост-

ранен в бокситах. Самые мелкие фракции  $<0,001$  мм сложены гидраргиллитом и каолинитом с существенным преобладанием первого в бокситах, а второго — в глинах.

Минералы титана в переотложенных продуктах выветривания представлены главным образом ильменитом и рутилом. Сфен, анатаз и титаномагнетит были обнаружены только в отдельных пробах и в единичных зернах, поэтому в табл. 23 они не отмечены. Ильменит является самым распространенным титановым минералом как в бокситах, так и в глинах. В бокситах (и глинах) он присутствует в неправильных зернах, совершенно неокатанных, неравномерно распределенных как в бобовинах, так и цементе (рис. 37), что свидетельствует о его терригенном происхождении. Характерной особенностью ильменита в бокситах и глинах является более высокая степень его лейкоксенизации по сравнению с изменением этого минерала в ниже залегающей коре выветривания. При исследовании аншлифов и цементированных полировок в отраженном свете устанавливается, что в бокситах и глинах больше половины содержащегося в них ильменита лейкоксенизировано, тогда как в коре выветривания лейкоксенизированный ильменит составляет не более 15—20% от общего количества этого минерала. Оптическая характеристика ильменита и продуктов его изменения (лейкоксенов), а также характер лейкоксенизации этого минерала в бокситах и глинах аналогичны описанным из коры выветривания (глава VI). Кроме того, доказательством высокой степени лейкоксенизации ильменита в переотложенном материале является также тот факт, что на поверхности аншлифов и полировок из бокситов и глин количество аутигенного рутила, представляющего конечный продукт лейкоксенизации ильменита, достигает 10—15% по сравнению с 3—5% такого же рутила, содержащегося в коре выветривания. Химизм процесса лейкоксенизации ильменита в продуктах переотложения коры выветривания подробно рассмотрен автором в специальной работе [120]. Основным выводом проведенных исследований заключается в том, что лейкоксенизация ильменита состоит в окислении двухвалентного железа в трехвалентное с последующим выносом последнего и обогащением оставшегося продукта окисью титана главным образом в форме рутила и реже — брукита (или анатаза, по данным других исследователей) и что при лейкоксенизации ильменита в гипергенных условиях происходит по существу процесс разделения железа и титана [120, стр. 233].

Таким образом, в бокситах и глинах минералы титана заимствованы из подстилающей коры выветривания. Ильменит, являющийся в переотложенных продуктах, как и в коре выветривания, самым распространенным титановым минералом, в значительной мере лейкоксенизирован. В сравнении с корой выветривания, в ее переотложенных продуктах в больших количествах присутствует рутил, являющийся конечным продуктом лейкоксенизации ильменита. Изменение (лейкоксенизацию) ильменита в бокситах и глинах района следует связывать с тем широко проявленным процессом глубокого химического преобразования коренных пород, который, начавшись в коре выветривания, продолжается в процессе ее переотложения [109].

### **Распределение Ti, Al, Nb, Ta, Th и Fe в продуктах переотложения коры выветривания (бокситах, глинах) и их отдельных фракциях**

#### **Распространение Ti, Al, Nb, Ta, Th и Fe в бокситах и глинах**

Содержания названных элементов и их отношения приведены в табл. 24, а соотношения титана с элементами-гидролизатами и железом показаны на рис. 21. Анализируя приведенные данные, отметим следующее.

Таблица 24

Содержания исследуемых окислов (элементов) и отношения между ними в бокситах и глинах, залегающих на коре выветривания изученных участков

Объекты исследований	n, %					n·10 <sup>-4</sup> , %		
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ок	FeO	Nb	Ta	Th
Бокситы	5,84	2,09	34,40	7,80	0,43	31,40	3,00	7,00
	15,73	4,69	44,96	27,92	1,89	32,10	3,40	12,0
	13,71 (5)	3,52 (5)	40,60 (5)	19,67 (5)	0,72 (5)	31,75 (2)	3,20 (2)	9,50 (2)
Глины огнеупорные*	24,70	2,40	35,18	0,50	0,07			
	49,28	3,88	46,41	3,55	2,55	7,6	0,9	—
	38,00 (17)	2,63 (17)	40,67 (17)	1,51 (5)	0,21 (5)	(1)	(1)	
Глины пестроцветные	13,88	1,19	27,11	8,22	0,07	0,51	0,62	3,0
	39,22	6,78	39,40	31,33	2,31	23,00	2,80	5,0
	32,93 (11)	2,88 (11)	30,03 (11)	15,30 (11)	0,52 (11)	10,55 (4)	1,78 (4)	4,33 (3)
Объекты исследований	n				n·10 <sup>2</sup>			
	$\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{TiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{TiO_2}{Fe_2O_3ок}$	$\frac{TiO_2}{FeO}$	$\frac{Ti}{Nb}$	$\frac{Ti}{Ta}$	$\frac{Ti}{Th}$	
Бокситы	2,02	0,04	0,12	2,48	6,87	63,52	18,0	
	6,73	0,11	0,26	9,95	8,75	93,66	40,2	
	3,55	0,08	0,19	6,90	7,81	78,59	29,1	
Глины огнеупорные*	0,86	0,05	0,02	8,00				
	1,62	0,09	0,29	15,41	11,84	100,0	—	
	0,98	0,06	0,20	12,14				
Глины пестроцветные	0,42	0,04	0,02	1,41	3,60	29,64	27,8	
	2,87	0,15	0,29	51,42	10,34	78,26	41,4	
	0,90	0,09	0,20	9,11	6,97	53,90	35,0	

\* По огнеупорным глинам использованы также данные Ф. А. Матвеевой [65].

1. Наиболее высокие содержания TiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и минимальные для SiO<sub>2</sub> устанавливаются в бокситах. Так, средние содержания TiO<sub>2</sub> в бокситах изменяются от 3,33 до 3,87%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—от 38,24 до 43,13% и SiO<sub>2</sub>—от 9 до 16,3%. Самые низкие содержания SiO<sub>2</sub> (9%) определены в каменистых разностях бокситов. Средние содержания окислов этих же элементов в глинах изменяются так: для TiO<sub>2</sub>—от 2,14 до 2,88%; для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—от 29,20 до 40,67% и для SiO<sub>2</sub>—от 31,74 до 38,0%. Содержание окисного железа как в бокситах, так и в глинах изменяется значительно: от 1—2 до 20—30%, редко больше. Содержания FeO также широко варьируют: в бокситах—от 0,43 до 1,89% (в среднем 0,72%); в глинах—от 0,07 до 2,31% (в среднем 0,52%). Весьма неравномерное распределение FeO в бокситах и глинах следует связывать с действием органического веществ

ва и вторичных наложенных процессов (образование шамозита, сидерита) [58].

Самые высокие содержания Nb, Ta и Th устанавливаются в бокситах: для Nb — от  $31,40 \cdot 10^{-4}\%$  до  $32,10 \cdot 10^{-4}\%$  (среднее  $31,75 \cdot 10^{-4}\%$ ); для Ta — от  $3,00 \cdot 10^{-4}\%$  до  $3,40 \cdot 10^{-4}\%$  (среднее  $3,20 \cdot 10^{-4}\%$ ); для Th — от  $7,0 \cdot 10^{-4}\%$  до  $12,0 \cdot 10^{-4}\%$  (среднее  $9,5 \cdot 10^{-4}\%$ ). В глинах содержания тех же элементов изменяются в следующих пределах: Nb — от  $0,51 \cdot 10^{-4}\%$  до  $23,00 \cdot 10^{-4}\%$  (среднее  $10,55 \cdot 10^{-4}\%$ ); Ta — от  $0,62 \cdot 10^{-4}\%$  до  $2,80 \cdot 10^{-4}\%$  (среднее  $1,78 \cdot 10^{-4}\%$ ) и Th — от  $3,0 \cdot 10^{-4}\%$  до  $5,0 \cdot 10^{-4}\%$  (среднее  $4,33 \cdot 10^{-4}\%$ ). Изменение количеств  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3^{ок}$ , FeO, Nb, Ta и Th в бокситах и глинах, высчитанных с учетом объемного веса этих пород (табл. 25), подтверждают описанное распределение указанных элементов по данным химических анализов.

Т а б л и ц а 25

Содержания исследованных окислов (элементов) в бокситах и глинах, рассчитанные с учетом объемного веса этих пород

Объекты исследований	$n, \text{г/см}^3$				$n \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3$		
	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3^{ок}$	FeO	Nb	Ta	Th
Бокситы	0,046	0,76	0,17	0,004	69,70	6,66	15,54
	$\frac{0,100}{0,077}$ (30)	$\frac{0,99}{0,89}$ (30)	$\frac{0,61}{0,43}$ (30)	$\frac{0,014}{0,008}$ (30)	$\frac{71,26}{70,48}$ (2)	$\frac{7,54}{7,10}$ (2)	$\frac{26,64}{21,09}$ (2)
	0,077 (30)	0,89 (30)	0,43 (30)	0,008 (30)	70,48 (2)	7,10 (2)	21,09 (2)
Глины	0,022	0,16	0,16	0,001	0,95	1,16	5,64
	$\frac{0,13}{0,054}$ (15)	$\frac{0,77}{0,56}$ (15)	$\frac{0,95}{0,34}$ (15)	$\frac{0,043}{0,009}$ (15)	$\frac{43,34}{37,97}$ (4)	$\frac{5,26}{4,79}$ (4)	$\frac{9,40}{8,14}$ (3)
	0,054 (15)	0,56 (15)	0,34 (15)	0,009 (15)	37,97 (4)	4,79 (4)	8,14 (3)

2. Среднее значение титанового модуля (отношение  $TiO_2 : Al_2O_3$ ) в бокситах равно 0,08; в глинах — 0,09. Значения титанового модуля как для всего бокситового материала, так и для его отдельных разностей изменяется в значительных пределах («пестрый тип титанового модуля», по терминологии Н. М. Страхова [110]). Так, по данным Д. И. Емельяновой, в бокситах балансовых запасов категорий В÷С<sub>1</sub> титановый модуль варьирует от 0,06 до 0,11; в рыхлых бокситах — от 0,06 до 0,12; в каменных бокситах — от 0,06 до 0,10 и в глинистых бокситах — от 0,07 до 0,11. В исследованных нами образцах бокситов отношение  $TiO_2 : Al_2O_3$  изменяется от 0,04 до 0,11. В глинах также устанавливается пестрый тип титанового модуля, значение которого варьирует в пределах от 0,04 до 0,15. Величина отношения  $TiO_2 : Fe_2O_3^{ок}$  в бокситах изменяется от 0,12 до 0,26 (среднее 0,19); в глинах — от 0,02 до 0,29 (среднее 0,20). Величина отношения  $TiO_2 : FeO$  в тех же породах меняется более значительно в соответствии с неравномерным распределением закисного железа, особенно в глинах, где крайние значения этого отношения составляют 1,41 и 51,42. Средние значения отношения  $Ti : Nb$  ( $n \cdot 10^2$ ) в бокситах равно 7,81; в глинах — 6,97 и 11,84. Средние значения отношения  $Ti : Ta$  ( $n \cdot 10^2$ ) в тех же породах равны соответственно 78,59 и 53,90; 100,00. Отношение  $Ti : Th$  ( $n \cdot 10^2$ ) в бокситах изменяется от 18,0 до 40,2 (среднее 29,1); в глинах — от 27,8 до 41,4 (среднее 35,0). Среднее значение отношения  $Nb : Ta$  в бокситах равно 9,9; в глинах — 5,9. Величина алюмокремневого модуля (отношение  $Al_2O_3 : SiO_2$ ) в исследованных нами образцах боксита изменяется от 2,02 до 6,73 (среднее 3,55). В отдельных разновидностях боксита эта величина меняется следующим образом: в рыхлых бокситах — от 2,77 до 2,90 (среднее 2,79); в глинистых бокситах — от 2,56 до 2,76 (среднее 2,64); в каменных бокситах —

от 4,18 до 4,35 (среднее 4,24). В глинах алюмокремневый модуль обычно меньше единицы и только в их бокситизированных разностях его величина возрастает до 1,6—2,8. Сравнивая приведенные отношения титана к элементам-гидролизатам и железу в бокситах и глинах с таковыми в коре выветривания амфиболитов (табл. 12), являющейся самой распространенной на изученных участках, отметим следующее. В сопоставляемых геологических образованиях значения отношений титана к алюминию и железу близки. Таким образом, можно полагать, что указанные отношения, возникшие в коре выветривания, в бокситах и глинах наследуются. Ввиду более высоких содержаний Nb и Ta в бокситах и глинах значения отношений  $Ti:Nb$  и  $Ti:Ta$  в этих породах ниже, чем в коре выветривания. Соотношение между Nb и Ta в коре выветривания амфиболитов, а также в бокситах и глинах сохраняется. Величина отношения  $Ti:Th$  в бокситах и глинах в 1,5—2,0 раза меньше, чем в коре выветривания амфиболитов.

Наследование бокситами титанового модуля, установленного в коре выветривания, является важным обстоятельством для понимания их происхождения. Н. М. Страхов [110, стр. 250] по этому поводу пишет: «Тот факт, что титановый модуль в бокситах как бы наследует этот модуль, возникший еще в коре выветривания, может означать только одно: что осадочные бокситы представляют собой механически переотложенный верхний, глиноземный горизонт латеритной коры выветривания». И далее (стр. 251): «Тот факт, однако, что титановый модуль бокситового пласта все же прямо отвечает модулю тесно связанной с бокситами коры выветривания, доказывает, что изменения отношений  $TiO_2:Al_2O_3$  в диагенезе имеют вполне второстепенное значение. Решали все процессы механического переотложения глиноземного горизонта коры выветривания. Тем самым выявляется и генетический тип самих бокситовых месторождений в качестве механически переотложенных масс верхнего горизонта латеритной коры выветривания». Материалы, изложенные в настоящей главе, совместно с данными по геологии (глава IV), позволяют считать, что изученные бокситы в Барзасском районе имеют латеритно-осадочное происхождение [17].

3. Соотношения титана с элементами-гидролизатами и железом в бокситах и глинах показаны на рис. 21. Представленные соотношения позволяют заключить, что из залегающей ниже коры выветривания бокситами и глинами наследуется взаимосвязь  $Ti$  с  $Al$ ,  $Nb$ ,  $Fe^{3+}$  и отсутствие таковой с  $Fe^{2+}$ . Кроме того, в бокситах и глинах восстанавливается прямая пропорциональная зависимость между  $Ti$  и  $Ta$ , а также взаимосвязь  $Ti$  и  $Th$ , хотя и слабо выраженная. Сказанное подтверждается соответствующими значениями коэффициентов корреляции между указанными элементами (табл. 26).

При истолковании установленных соотношений следует иметь в виду, что при образовании бокситов и глин материал коры выветривания продолжает изменяться, достигая стадии формирования свободных окислов (появление латеритов, а затем бокситов). При этом ильменит, являющийся самым распространенным и относительно слабо измененным в коре выветривания минералом, в бокситах и глинах значительно лейкоксенизируется. Весьма вероятно, что в процессе лейкоксенизации ильменита часть содержащейся в нем двуокиси титана переходит в дисперсные фракции переотложенных продуктов. Таким образом, по сравнению с корой выветривания в бокситах и глинах в связи со значительным изменением ильменита может происходить дальнейшее обогащение  $TiO_2$  дисперсных фракций, где (глава VI) в силу близости химических свойств титана и других элементов-гидролизатов между ними будет устанавливаться взаимосвязь. Вероятно, поэтому в бокситах и глинах устанавливается геохимическая связь  $Ti$  с  $Ta$  и  $Th$ .



В то же время следует отметить, что корреляционная связь титана с другими элементами-гидролизатами и железом в бокситах и глинах ослаблена, что подтверждается относительно низкими значениями соответствующих коэффициентов корреляции (табл. 26). Результаты расчета доли  $TiO_2$ , связанной с титановыми минералами в бокситах и глинах, приведены в табл. 27. Эти данные позволяют сделать заключение, что, как и в коре выветривания, в бокситах и глинах значительная часть общего количества  $TiO_2$  связана с минералами титана (ильменитом, рутилом). Так, в бокситах с ильменитом может быть связано от 12 до

Таблица 27

Расчет доли  $TiO_2$ , связанной с ильменитом и рутилом в бокситах и глинах\*

Объекты исследований	Содержание титановых минералов в породе, вес. %	Содержание $TiO_2$ в минерале, вес. %	Количество $TiO_2$ в минерале, мг, приходящееся на 1 г породы	Процент $TiO_2$ , приходящийся на данный минерал в породе	Содержание $TiO_2$ в породе	
					мг/г	%
Бокситы	Ильменит	~60,0	2,94	12,0 (20)**	24,4	2,44
	от 0,56 до 6,00					
	Рутил	100,0	1,2	(7)	12,5	1,25
	от 0,12 до 1,44					
Глины	Ильменит	~60,0	1,52	10,0 (10)	12,5	1,25
	от 0,29 до 2,80					
	Рутил	100,0	3,0	(5)	14,8	1,48
	от 0,29 до 1,40					

\* При расчетах были использованы данные Н. А. Лисицкой и М. В. Пастуховой [58].

\*\* Цифры в скобках означают количество рассчитанных проб.

90% содержащегося в них  $TiO_2$ ; с рутилом — от 10 до 100%  $TiO_2$ . В глинах на долю ильменита и рутила приходится от 10 до 60% присутствующего в них  $TiO_2$ . Широкие пределы колебания значений той доли  $TiO_2$  (от 10 до 90—100%), которая связывается с ильменитом и рутилом, нужно объяснять весьма неравномерным распределением этих минералов в бокситах и глинах, в общем наследующих столь же неравномерное их распределение в коре выветривания. Таким образом, как и в коре выветривания, присутствие значительных количеств титана в собственной минеральной форме ослабляет корреляционную связь этого элемента с другими элементами-гидролизатами и железом в бокситах и глинах.

Распределение Ti, Al, Nb, Ta, Th и Fe в отдельных фракциях, выделенных из бокситов и глин

Содержания исследуемых элементов и их соотношения в различных фракциях бокситов и глин приведены в табл. 28, 29 и показаны на рис. 22, 23. Анализируя эти данные, отметим следующее.

1. В различных фракциях бокситов и глин  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3^{ок}$ , FeO, Nb, Ta и Th распределены так же, как и в соответствующих фракциях коры выветривания (глава VI). Минимальные содержания  $TiO_2$

Содержания исследуемых окислов (элементов) во фракциях из бокситов и глин

Объекты исследова- ний	Фракция >0,05 мм										Фракция 0,05—0,01 мм														
	n, %					n·10 <sup>-4</sup> %					n, %					n·10 <sup>-4</sup> %									
	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th		
Бокситы	3,33	28,68	19,26	0,42				16,00	2,32	33,67	7,35	0,21													
	4,36	43,75	37,86	2,46				25,05	6,40	45,87	20,44	0,86													
	3,84(5)	36,21(5)	28,56(5)	1,44(5)	43,72 (1)	3,34 (1)	5,3 (1)	21,49(5)	4,74(5)	39,78(5)	14,18(5)	0,51											2,12 (1)	12,0 (1)	
Глины	0,75	6,20	13,35	0,36				15,90	1,98	15,80	4,70	0,07													
	7,05	37,83	62,48	10,74	44,27 (1)			59,96	8,25	45,52	54,85	0,71													
	3,00(15)	21,77(15)	25,37(15)	4,19(15)				34,95(15)	4,93(15)	29,53(15)	15,60(15)	0,25(15)											8,73 (1)	4,01 (1)	4,0 (1)
Объекты исследо- ваний	Фракция 0,01—0,001 мм										Фракция <0,001 мм														
	n, %					n·10 <sup>-4</sup> %					n, %					n·10 <sup>-4</sup> %									
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>ок</sup>	FeO	Nb	Ta	Th	
Бокситы	22,08	3,38	33,97	8,73	0,14			17,85	0,90	35,93	5,47	0,14													
	28,13	4,15	43,31	18,47	0,21			26,21	4,94	45,75	16,90	0,28													
	24,32(5)	3,76(5)	37,82(5)	15,05(5)	0,16(5)	9,78 (1)	2,70 (1)	10,0 (1)	23,92(5)	2,70(5)	41,93(5)	11,52(5)	0,19(5)										10,48 (1)	1,63 (1)	10,0 (1)
Глины	19,02	1,50	12,42	3,98	0,07			17,17	0,71	18,22	6,80	0,07													
	63,06	5,00	46,20	44,82	0,17			46,22	2,95	48,65	39,59	0,28													
	38,32(15)	2,62(15)	33,25(15)	10,26(15)	0,11(15)	12,58 (1)	6,63 (1)	3,0 (1)	34,66(15)	1,43(15)	33,22(15)	15,51(15)	0,17(15)											5,24 (1)	2,12 (1)

## Отношения между исследуемыми оксидами (элементами) во фракциях из бокситов и глин

Объекты исследования	Фракция >0,05 мк										Фракция 0,05—0,01 мк																			
	Ti					Nb					Ta					Ti					Nb					Ta				
	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$				
Бокситы	0,09	0,08	1,77	5,97	78,14	49,3	1,34	0,05	0,19	7,33	—	—	0,05	0,19	7,33	—	—	—	—	0,26	0,07	0,04	9,00	—	—	—	—	—		
	0,41	0,22	7,92	5,97	78,14	49,3	2,34	0,16	0,64	14,03	—	—	0,16	0,64	14,03	—	—	—	—	2,86	0,28	1,35	37,85	—	—	—	—	—		
	0,40*	0,15	4,84	—	—	—	1,92	0,12	0,37	10,35	—	—	0,12	0,37	10,35	—	—	—	—	0,70	0,18	0,53	18,46	—	—	—	—	—		
Глины	0,04	0,01	0,12	4,35	—	19,32	0,26	0,07	0,04	9,00	—	—	0,07	0,04	9,00	—	—	—	—	0,26	0,07	0,04	9,00	—	—	—	—	—		
	0,19	0,68	8,30	4,35	—	19,32	2,86	0,28	1,35	37,85	—	—	0,28	1,35	37,85	—	—	—	—	2,86	0,28	1,35	37,85	—	—	—	—	—		
	0,10	0,16	3,54	—	—	—	0,70	0,18	0,53	18,46	—	—	0,18	0,53	18,46	—	—	—	—	0,70	0,18	0,53	18,46	—	—	—	—	—		
Объекты исследования	Фракция 0,01—0,001 мк										Фракция <0,001 мк																			
Бокситы	Ti					Nb					Ta					Ti					Nb					Ta				
	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}}$	$\frac{\text{TiO}_2}{\text{FeO}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Nb}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Ta}}$	$\frac{\text{Ti}}{\text{Th}}$		
	1,20	0,08	0,18	17,85	25,46	92,22	24,9	1,37	0,01	0,16	3,21	—	—	—	1,37	0,01	0,16	3,21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1,90	0,11	0,42	29,64	25,46	92,22	24,9	2,47	0,13	0,29	15,13	—	—	—	2,47	0,13	0,29	15,13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
1,57	0,09	0,27	23,87	25,46	92,22	24,9	1,83	0,06	0,23	7,29	—	—	—	1,83	0,06	0,23	7,29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Глины	0,31	0,03	0,05	41,88	12,48	25,49	56,4	0,71	0,01	0,03	1,96	—	—	—	0,71	0,01	0,03	1,96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	2,20	0,19	0,94	35,71	12,48	25,49	56,4	2,83	0,09	0,26	21,07	—	—	—	2,83	0,09	0,26	21,07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	0,76	0,08	0,41	21,11	12,48	25,49	56,4	0,82	0,04	0,11	11,06	—	—	—	0,82	0,04	0,11	11,06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

\* Средняя величина отношения, вычисленная на основании числа анализов, указанных в табл. 28.

устанавливаются во фракциях  $<0,001$  мм, максимальные — во фракциях  $0,01—0,05$  мм, где отмечается и самое высокое содержание титановых минералов. С увеличением крупности материала и содержания  $TiO_2$  в нем растет неравномерность распределения этого элемента, что подтверждается повышением соответствующих значений коэффициентов вариации в изученных фракциях (табл. 26). В противоположность распределению  $TiO_2$  максимальные содержания  $Al_2O_3$  отмечены во фракциях  $<0,001$  мм, а минимальные — в крупных ( $>0,05$  мм) фракциях. В крупных фракциях распределение  $Al_2O_3$  более неравномерно в сравнении с фракциями  $0,01—0,001$  мм и  $<0,001$  мм.

$Fe_2O_3^{ок}$  в изученных фракциях из бокситов и глин распределена примерно так же, как и  $TiO_2$ . Минимальные содержания  $Fe_2O_3^{ок}$  устанавливаются в мелких ( $0,01—0,001$  мм и  $<0,001$  мм) фракциях, а максимальные — в самых крупных ( $>0,05$  мм). С увеличением крупности материала коэффициенты вариации для  $Fe_2O_3^{ок}$  в нем возрастают (табл. 26). Приведенные данные по распределению  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $Fe_2O_3^{ок}$  в различных фракциях из бокситов и глин совпадают с результатами исследований М. В. Пастуховой [83]. Содержание  $FeO$  резко (на порядок и больше) увеличивается во фракциях  $>0,05$  мм. Для Nb как в бокситах, так и в глинах характерно повышенное содержание в крупных ( $>0,05$  мм) фракциях, превышающее количество его в более мелких фракциях в 4—8 раз. Ta и Th в выделенных фракциях распределены относительно равномерно, так что содержания этих элементов в них редко разнятся более чем в два раза.  $SiO_2$  во фракциях из бокситов и глин распределена равномерно, что подтверждается близкими значениями коэффициентов вариации для двуокиси кремния в них (табл. 26).

2. Поскольку исследуемые элементы в изученных фракциях бокситов и глин распределены так же, как и в соответствующих фракциях коры выветривания, то отношения титана к элементам-гидролизатам (Al, Nb, Ta, Th) и железу в различных фракциях сравниваемых образований изменяются аналогично. Тенденция этих изменений описана в главе VI, а значения отношений титана к элементам-гидролизатам и железу в различных фракциях бокситов и глин и коэффициенты вариации для этих отношений приведены в табл. 26, 29. Таким образом, распределение титана, других элементов-гидролизатов и железа в различных фракциях и отношения титана к этим элементам, установленные для коры выветривания, в соответствующих фракциях бокситов и глин наследуются.

3. Соотношения титана с Al, Nb, Ta, Th и железом в различных фракциях бокситов и глин, представленные на рисунках 24—29, позволяют отметить следующее. Указанные соотношения, которые были установлены при изучении материала разной крупности в коре выветривания и характер которых подробно описан в предыдущей главе, в соответствующих фракциях бокситов и глин сохраняются (наследуются). Кроме того, в самых мелких ( $<0,001$  мм и  $0,001—0,01$  мм) фракциях бокситов и глин намечается прямая пропорциональная зависимость между Ti и Th.

Следует считать также, что причины, обусловившие соотношения титана с другими элементами-гидролизатами и железом в разных фракциях бокситов и глин, те же, которые определили подобные соотношения в материале разной крупности в коре выветривания (глава VI). В табл. 30 приведены результаты расчета доли  $TiO_2$ , связанной с наиболее распространенным титановым минералом — ильменитом — в различных фракциях бокситов и глин. Эти данные показывают, что с увеличением крупности материала количество  $TiO_2$ , связанное с ильменитом, возрастает. Так, в бокситах во фракциях  $0,001—0,01$  мм с ильменитом связано 7—8% общего количества  $TiO_2$  в них, во фракциях  $0,01—0,05$  мм — 33—38%, а во фракциях  $>0,05$  мм — до 80—90%. В глинах

связанная с ильменитом доля  $TiO_2$  возрастает с 6—7% во фракциях 0,001—0,01 мм до 30—31% во фракциях >0,05 мм. Количество  $TiO_2$ , связанное с рутилом, в изученных фракциях, обычно не превышает 10—15%. Таким образом, как и в коре выветривания, присутствие значительного количества титана в собственной минеральной форме (ильменит, рутил) в крупных фракциях ослабляет и нарушает корреляционную связь этого элемента с другими элементами-гидролизатами, за исключением ниобия, также концентрирующегося в ильмените и рутиле и обнаруживающем поэтому взаимосвязь с титаном даже в самых круп-

Таблица 30

Расчет доли  $TiO_2$ , связанной с ильменитом и рутилом во фракциях из бокситов и глин

Фракция, мм	Содержание ильменита и рутила во фракциях*, вес. %	Содержание $TiO_2$ в минерале, вес. %	Количество $TiO_2$ в минерале, мг, приходящееся на 1 г материала фракции	Процент $TiO_2$ , приходящийся на данный минерал во фракции	Содержание $TiO_2$ во фракциях	
					мг/г	%
0,001—0,01	Ильменит 0,5	60,0	3,60	8,0(5)**	Бокситы 37,6	3,76
0,01—0,05	Ильменит 3,0	60,0	18,0	38,0	47,4	4,74
	Рутил 0,5	100,0	5,0	10,0		
>0,05	Ильменит 5,8	60,0	34,80	90,0	38,4	3,84
	Рутил 0,38	100,0	3,8	10,0		
0,001—0,01	Ильменит 0,3	60,0	1,80	7,0(15)	Глины 26,2	2,62
0,01—0,05	Ильменит 1,80	60,0	10,8	22,0	49,3	4,93
	Рутил 0,74	100,0	7,4	15,0		
>0,05	Ильменит 1,70	60,0	10,2	31,0	30,0	3,00
	Рутил 0,30	100,0	3,0	10,0		

\* Содержание ильменита и рутила во фракциях заимствованы из табл. 23, а содержание  $TiO_2$  — из табл. 28.

\*\* Цифры в скобках означают количество рассчитанных фракций.

ных (>0,05 мм) фракциях. Во фракциях <0,001 мм, где титановые минералы отсутствуют, следует полагать, что титан и другие элементы-гидролизаты (Al, Nb, Ta, Th) связаны главным образом либо с минералами глинозема (гидраргиллитом, в бокситах), либо с глинистыми минералами (каолинитом, в глинах).

Как и в коре выветривания, наиболее тесная взаимосвязь  $TiO_2$  и  $Fe_2O_3^{ок}$  устанавливается в крупных фракциях бокситов и глин. Подобный факт в отношении бокситов имеет определенный генетический смысл. М. В. Пастухова [83], изучавшая распределение  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  и  $Al_2O_3$  в бобовинах и цементе континентальных бокситов Тургая, пришла к следующим выводам. В терригенных бобовинах бокситовых пород  $TiO_2$  отчетливо связана с  $Fe_2O_3$ , в цементе же — с  $Al_2O_3$ . Подобные соотношения, по мнению М. В. Пастуховой, свидетельствуют в пользу терригенного происхождения бокситовых пород. При этом источником терриген-

ных бобовин была, вероятно, самая верхняя зона латеритного профиля, где устанавливается связь титана с окислами железа. Цемент бокситов возникал за счет переотложения глинистых продуктов верхних зон коры выветривания, в которых  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  сохраняют постоянство соотношений. Нами не производилось непосредственного разделения бобовин и цемента бокситов. Тем не менее проведенные минералогические и химические исследования выделенных фракций дают основания параллелизовать состав наиболее крупных ( $>0,05$  мм и  $0,05-0,01$  мм) из них с составом бобовин (по М. В. Пастуховой), а более мелких ( $0,01-0,001$  мм и  $<0,001$  мм) — с составом цемента. В крупных фракциях, по нашим данным,  $TiO_2$ , как отмечалось выше, тесно связана с  $Fe_2O_3^{ок}$ , а в мелких — с  $Al_2O_3$ . Таким образом, проведенными исследованиями выводы М. В. Пастуховой относительно генетического истолкования распределения  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  и  $Al_2O_3$  в бокситах подтверждаются и представляются нам правильными.

Для выяснения форм нахождения исследуемых элементов в изученных фракциях бокситов и глин, как и для коры выветривания, был произведен расчет количеств (выходов)  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3^{ок}$ ,  $FeO$ ,  $Nb$ ,  $Ta$  и  $Th$ , связанных с выделенными фракциями, и проанализированы соотношения выходов указанных элементов с выходом соответствующих фракций (рис. 30—36). При анализе этих соотношений учитывались положения, изложенные в главе VI. Устанавливается, что форма нахождения исследуемых элементов в различных фракциях бокситов и глин наследуется от коры выветривания. Алюминий, тантал и торий во всех фракциях бокситов и глин входят в структуру главным образом глиноземистых и глинистых минералов.  $Ti^{4+}$  и  $Fe^{3+}$  связаны с этими минералами только в мелких фракциях. В крупных фракциях  $Ti^{4+}$  и  $Fe^{3+}$  в значительной степени концентрируются в собственной минеральной форме (ильмените, рутиле, лимоните).  $Nb$  связан с титановыми минералами: ильменитом, рутилом.  $Fe^{2+}$ , вероятно, закономерно распределен в материале изученных фракций.

Таким образом, как и для коры выветривания, изучение распределения и соотношения между исследуемыми элементами в различных фракциях бокситов и глин помогают понять поведение этих элементов и установить формы их нахождения в данных фракциях.

### Основные выводы

1. На изученных участках бокситы и глины пространственно и генетически тесно связаны с корой выветривания и являются продуктами ее переотложения. Соотношения титана с  $Al$ ,  $Nb$ ,  $Ta$ ,  $Th$  и  $Fe$ , а также формы нахождения этих элементов, установленные в коре выветривания, в бокситах и глинах сохраняются.

2. В процессе переотложения коры выветривания и формирования бокситов и глин происходит дальнейшая химическая переработка материала исходных пород. При этом ильменит — основной титановый минерал — в сравнении с корой выветривания заметно изменяется (лейкоксенизируется). Значительная часть  $TiO_2$  в бокситах (до  $80-100\%$ ) и глинах (до  $30-40\%$ ) связана с собственными минералами титана (ильменитом, рутилом). Этим обстоятельством следует объяснять ослабление и нарушение корреляционных связей титана с другими элементами-гидролизатами и железом, а также пестрый тип титанового модуля в бокситах.

3. Изученные бокситы имеют латеритно-осадочное происхождение. Наследование бокситами титанового модуля, установленного в коре выветривания, позволяет считать, что при их формировании основная мас-

са бокситового материала и минералов титана была переотложена из коры выветривания механическим путем. Последовавшие затем процессы диагенеза, окончательно сформировавшие боксит как породу, оказывали влияние на перераспределение титана и других элементов-гидролизатов, но это влияние было второстепенным.

## Глава VIII

### ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТИТАНА В КОРЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ РАЙОНА И ИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

#### Условия залегания и морфология зон обогащенной титаноносной коры выветривания

На приведенных в главе IV картах и геологических разрезах (рис. 3—10) показаны залегания и формы зон обогащенной титаноносной коры выветривания с содержанием  $TiO_2$  более 4,0%. На всех участках условия залегания таких зон в значительной мере определяются рельефом протерозойского фундамента. Обычно эти зоны связаны с депрессиями фундамента, вытянутыми в северо-западном направлении, которое в свою очередь согласуется с северо-западным простираем протерозойских толщ амфиболитов и известняков. Обогащенные зоны располагаются главным образом на склонах этих депрессий. Реже они приурочены к возвышенным водораздельным участкам или залегают в глубоких впадинах на известняках, имеющих карстовое происхождение. Часто зоны обогащенной титаноносной коры выветривания залегают в коре выветривания амфиболитов, характеризующихся повышенным содержанием титана. Однако нередки случаи, когда они лежат на известняках, практически лишенных титана, или на амфиболитах, сланцах и габбро с низким содержанием этого элемента. Эти факты свидетельствуют о том, что при формировании этих зон значительную роль играли процессы перемещения выветрелого материала, причем масштабы перемещения были незначительны и не превышали, по-видимому, первых сотен метров. В разрезе коры выветривания такие зоны приурочены в основном к ее верхним переотложенным горизонтам. Сравнительно редко обогащенные зоны охватывают коры выветривания на полную мощность. Обычно это имеет место в относительно глубоких депрессиях (впадинах) фундамента, куда перемещался богатый титаном материал коры выветривания.

Условия залегания, определяющиеся рельефом фундамента, в значительной мере обуславливают морфологию зон обогащенной титаноносной коры выветривания. Обычно они имеют линейно вытянутую в северо-западном направлении форму, залегающую на склонах депрессий в фундаменте. Если обогащенные зоны нескольких депрессий сливаются, то образуют сложную в плане форму. Наиболее расчлененный рельеф фундамента и сложные по форме зоны отмечаются на Еденисском участке. К северу, в направлении Гавриловского участка рельеф фундамента и форма таких зон в коре выветривания становятся менее сложными. Другим фактором, определяющим морфологию обогащенных зон, является неравномерное распределение титана в коре выветривания, унаследованное от коренных пород. Поэтому в профиле выветривания уча-

стки с высоким (более 4%) содержанием двуокиси титана могут встречаться, хотя и не очень часто, не только в верхней его части, но в средних и даже нижних горизонтах. Это объясняет показанное в некоторых местах на разрезах расслаивание единой обогащенной зоны на две, редко на большее число зон, разделенных безрудными интервалами различной мощности. Мощность зон обогащенной титаноносной коры выветривания изменяется в широких пределах: от 1 до 52 м и обычно максимальна во впадинах фундамента.

### **Условия образования высоких концентраций титана в коре выветривания района**

В предыдущих главах было показано, что максимальные содержания двуокиси титана устанавливаются в амфиболитах терсинской свиты и достигают 4,0—4,5%. В коре выветривания на этих породах содержания двуокиси титана возрастают в 1,5—5,0 раз, составляя 6—8—10% и увеличиваясь иногда до 19,0%. Установленный факт накопления титана в продуктах выветривания широко известен и подтверждается результатами работ ряда исследователей [15, 61, 70, 103]. Расчет количеств титана в исходных породах и их выветрелых продуктах с учетом изменения объемного веса пород при выветривании и вычисление коэффициентов концентрации (табл. 14, глава VI) показывают, что последние равны или близки единице, что свидетельствует о малой подвижности этого элемента в процессе выветривания. Таким образом, следует считать, что накопление титана в коре выветривания как элемента малоподвижного связано с выносом других легкоподвижных элементов исходных пород при их выветривании. Накопление  $TiO_2$  и вынос  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  и серы при формировании коры выветривания на амфиболитах приводится на табл. 31. Анализ большого фактического материала, полученного в результате поисково-разведочных работ на всех четырех участках, показывает, что все обогащенные зоны пространственно и генетически связаны с корой выветривания амфиболитов, характеризующихся повышенной титаноносностью. Как правило, высокому содержанию титана в коренных амфиболитах соответствуют повышенные содержания этого элемента и в коре выветривания на них. В непороченной коре выветривания, залегающей на породах с низким (<1%) содержанием титана (сланцах, габбро), зоны, обогащенные  $TiO_2$ , отсутствуют. Очевидно, масштабы выноса подвижных элементов при выветривании этих пород недостаточны для образования высоких концентраций титана в их выветрелых продуктах.

Можно думать поэтому, что необходимым условием возникновения высоких концентраций титана в коре выветривания является прежде всего богатый коренной источник этого элемента и интенсивный вынос легкоподвижных элементов при формировании коры выветривания на нем.

При анализе условий залегания зон обогащенной титаноносной коры выветривания отмечалось, что в их формировании играли роль процессы механического переотложения материала коры выветривания. При этом материал верхних зон коры выветривания, наиболее обогащенный титаном, локализовался в определенных геоморфологических формах рельефа фундамента — главным образом на склонах депрессий и в меньшей мере — на водораздельных участках и глубоких впадинах карстового происхождения. При переотложении материала коры выветривания происходило, вероятно, также дальнейшее обогащение его титаном (в форме ильменита, реже рутила) за счет выноса легких фракций, сло-

женных главным образом глинистыми минералами. Таким образом, механическое перетотложение продуктов выветривания, обогащенных титаном, следует также считать благоприятным условием возникновения высоких концентраций титана в коре выветривания. Учитывая незначительные (первые сотни метров) масштабы перемещения выветрелого материала, можно думать, что обогащение его при этом тяжелыми титановыми минералами было небольшим.

Т а б л и ц а 31

Миграция элементов при формировании коры выветривания на амфиболитах  
(в вес. %)

Компоненты	Амфиболиты	Кора выветривания	Амфиболиты	Кора выветривания	Амфиболиты	Кора выветривания	Привнос — вынос, г/100 см <sup>3</sup>
	по А. Н. Сухариной и Д. И. Емельяновой [11]		приведенные к 100%		количество компонентов, г/100 см <sup>3</sup>		
SiO <sub>2</sub>	47,77	34,57	48,34	41,74	128,13	81,39	—46,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,02	22,00	17,43	26,56	45,84	51,79	+ 5,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,58	20,24	1,62	24,40	4,26	47,58	+43,32
FeO	8,48	0,25	8,68	0,29	23,00	0,56	—22,44
TiO <sub>2</sub>	1,07	4,23	1,10	5,10	2,89	9,94	+ 7,05
MgO	8,31	0,28	8,57	0,33	22,65	0,65	—22,00
CaO	10,48	0,48	10,73	0,57	28,42	1,11	—29,11
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	2,49	0,40	2,54	0,47	6,78	0,92	— 5,86
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,37	0,19	0,44	0,50	0,86	+ 0,36
S	0,20	0,09	0,20	0,10	0,53	0,20	— 0,33
Сумма	97,59	82,81	100,00	100,00	263,0	195,00	— 68,0
Объемный вес			2,63	1,95			

Изложенное выше позволяет считать, что зоны повышенной титаносности в коре выветривания района представляют по существу элювиальные и элювиально-делювиальные ильменитовые (и реже ильменит-рутиловые) россыпи, возникшие на породах с повышенным содержанием титана при участии процессов механического перетотложения выветрелых продуктов.

### О возможности обогащения титаноносных кор выветривания района

Самым распространенным минералом титана в коре выветривания является ильменит. Поэтому обогащение титаноносных кор выветривания предусматривает разработку методов наиболее полного и рационального извлечения ильменита из выветрелого глинистого материала. Этими вопросами занимались обогатительные лаборатории ВИМС и ГИРЕДМЕТ (Москва), ИРГИРЕДМЕТ (Иркутск), Западно-Сибирское геологическое управление (Новокузнецк). При этом указанными организациями использовались широко распространенные методы обогащения — гравиметрическое разделение исходного материала на вибрационных столах или гидроклассификаторах с последующей электромагнитной сепарацией — обычно применяемые для обогащения песков из россыпей. В отношении мелко- и тонкозернистого глинистого материала

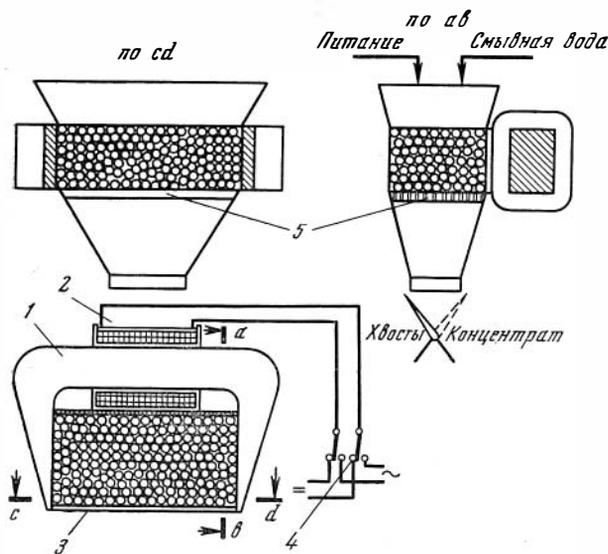


Рис. 38. Принципиальная схема объемного магнитного сепаратора

Объяснение см. в тексте

коры выветривания на изученных участках применение указанных методов в общем не дало положительных результатов. Среднее извлечение двуокиси титана в ильменитовом концентрате не превысило 46,9% при содержании  $TiO_2$  в нем 44,0—45,0% и выходе готового концентрата 4,8% от исходного глинистого материала. Было сделано заключение, что низкое извлечение ильменита обусловлено приуроченностью его к тонким ( $-0,074$  мм) фракциям коры выветривания, что делает нерентабельным промышленную обработку обогащенного титаноносного глинистого материала, несмотря на благоприятные экономические, горно-технические, гидрогеологические условия и комплексность (совместная обработка бокситов и огнеупорных глин).

В Институте геологии и геофизики СО АН СССР был разработан способ извлечения ильменита из тонкозернистого материала коры выветривания, основанный на предлагаемом методе объемной магнитной сепарации. Этот способ разработан старшими научными сотрудниками Института В. И. Молчановым, С. И. Голосовым, В. М. Кляровским при участии автора настоящей работы.

Принципиальная схема сконструированной установки (сепаратора) представлена на рис. 38. Сепаратор имеет магнитную систему, состоящую из сердечника (1), на котором помещается обмотка электромагнита (2). Рабочей частью сепаратора является емкость (3), расположенная между полюсами сердечника электромагнита и заполненная стальными шарами или телами произвольной формы из другого ферромагнитного материала. Боковые стенки емкости и ее дно, представляющее колосниковую решетку (5), выполнены из немагнитного материала, а торцевые стенки — стальные. Поперечное сечение емкости (относительно направления магнитного потока) приблизительно в два раза больше сечения магнитопровода, а длина — максимально допустимая по конструктивным соображениям. Размеры шаров, заполняющих рабочую емкость, выбираются минимальными с целью обеспечения максимальной силы взаимодействия с частицами обрабатываемой руды, но во избежание зависания немагнитных частиц диаметр стальных шаров

должен минимум в 10 раз превышать размеры самых крупных частиц. Теоретически в зазорах между шарами может накапливаться магнитная фракция в объеме, составляющем 42% от объема емкости, вмещающей стальные шары. Фактически фильтрация пульпы прекращается несколько раньше, и начинается цикл разгрузки сепаратора, когда прекращается подача пульпы, отключается питание электромагнитной системы (4), подается промывочная вода и слив направляется в особую емкость для приема магнитного концентрата. Лабораторные эксперименты по обогащению титаноносных глин коры выветривания проведены с использованием электромагнитной системы магнитного анализатора УЛЭМС-1. Жидкая пульпа (с соотношением исходная глина : вода = 1 : 10) пропусклась через камеру из оргстекла емкостью 200 см<sup>3</sup>, заполненную стальными шарами диаметром около 5,0 мм.

В сепараторах, основанных на известных способах, выделение магнитных зерен происходит под действием сил одного из полюсов разомкнутой магнитной системы. В сепараторе, основанном на предлагаемом методе, подвергаемая обогащению пульпа прокачивается через объем, заполненный стальными шарами, находящимися в магнитном поле, причем для уменьшения потерь магнитного потока магнитная система замыкается через шары. Помимо полной замкнутости магнитной системы, в предлагаемом методе увеличение напряженности магнитного поля обеспечивается также максимально возможным снижением поперечных размеров обрабатываемых струй пульпы, так как диаметры применяемых шаров и соответствующие им размеры пор могут подбираться в зависимости от крупности обогащенного материала. Магнитные частицы в этом случае непосредственно контактируют с полюсами на шарах, при этом они могут удерживаться сразу двумя полюсами соседствующих шаров, замыкая через себя магнитный поток. Высокая неравномерность поля возникает в результате того, что в областях контактов двух соседних шаров по направлению поля напряженность его максимальна, в то время как по окружности каждого шара нормально к направлению поля должна проходить нейтраль между северным и южным полюсами. Таким образом, в отличие от известных систем, при предлагаемом методе в рабочей зоне сепаратора образуется большое количество равномерно распределенных точек максимальной напряженности поля с большим общим объемом участков накопления и минимальными путями движения магнитных частиц перед закреплением. Весьма интересной особенностью предлагаемого метода объемной магнитной сепарации является дифференцированность действующих сил на частицы различного размера. Если в существующих способах магнитной сепарации напряженность магнитного поля одинакова для частиц различного размера, то в предлагаемой конструкции наиболее мелкие частицы, проникая в уменьшающиеся зазоры между шарами, могут закрепляться ближе к точкам соприкосновения шаров по направлению поля, причем действующая сила на них увеличивается. Это обстоятельство позволяет компенсировать увеличение действующих гидродинамических сил и сил трения на наиболее мелкие частицы в процессе движения пульпы.

Конструкция установки, принцип ее действия и результаты лабораторного обогащения проб титаноносной коры выветривания подробно изложены в специальной работе [30]. Предлагаемый метод объемной магнитной сепарации позволяет извлекать практически полностью весь ильменит, содержащийся в исходных пробах. При этом выход концентрата составил 10,39%, содержание TiO<sub>2</sub> в нем 47,7% и извлечение TiO<sub>2</sub> достигло 73,5%. Простая конструкция установки, малый расход электроэнергии при ее работе и высокое извлечение ильменита из глин коры выветривания позволяют надеяться получить также положительные результаты при испытании установки в промышленных условиях. Это даст

возможность перевести разведанные участки обогащенной титаноносной коры выветривания в разряд рентабельных для промышленной обработки.

### Основные выводы

I. Участки обогащенной титаноносной коры выветривания Барзаского района являются элювиальными и элювиально-делювиальными россыпями, образовавшимися на исходных породах (амфиболитах) с повышенной титаноносностью при участии процессов механического переноса и отложения выветрелого материала.

II. Предлагаемый метод объемной магнитной сепарации позволяет получать кондиционный ильменитовый концентрат из глинистого материала коры выветривания. В совокупности с благоприятными геолого-экономическими условиями района, возможностью применения открытых (карьерных) разработок при попутной добычи кондиционных бокситов и огнеупорных глин этот метод может сделать рентабельной обработку разведанных запасов титана в коре выветривания района.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение распределения титана и его соотношений с другими элементами-гидролизатами (Al, Nb, Ta, Th) и железом в генетическом ряду: материнские кристаллические породы (амфиболиты) — кора выветривания на них — продукты ее переотложения (глины, бокситы) показывает, что поведение этого элемента в значительной мере предопределено формами его нахождения и соотношениями с родственными элементами в исходных породах. В них из рассмотренных элементов группы гидролизатов только титан образует собственные минеральные формы (ильменит, рутил, сфен, титаномагнетит), причем с ними (главным образом с ильменитом) связано до 90,0% общего количества  $TiO_2$  и почти весь ниобий. Остальные элементы-гидролизаты и железо содержатся в основном в породообразующих минералах (плагноклазах, роговой обманке). Присутствие основной массы титана в амфиболитах в форме собственных минералов является причиной ослабления и нарушения корреляционных связей этого элемента с другими из группы гидролизатов, а также с железом. Корреляционная связь между указанными элементами устанавливается в случае их изоморфного вхождения в кристаллическую структуру наиболее распространенных породообразующих минералов — амфиболов ( $Ti-Th$ ;  $Ti-Fe^{2+}$ ) или в титановые минералы, например, ильменит ( $Ti-Nb$ ).

При выветривании исходных пород, а также в процессе образования глин и бокситов отмеченные соотношения титана с другими элементами-гидролизатами, а также железом наследуются и изменяются. При переходе от коры выветривания к продуктам ее переотложения — глинам, бокситам — корреляционные связи титана с указанными элементами в общем возрастают. Это следует связывать с теми превращениями коренных пород, которые происходят при их выветривании. Суть этих превращений состоит в гидролизе минералов материнских пород. При этом в результате разрушения породообразующих и неустойчивых титановых (в нашем случае — сфена) минералов содержащиеся в них титан и другие элементы-гидролизаты обогащают дисперсные фракции

выветрелых продуктов. В глинах и бокситах такое обогащение максимально, так как в них изменению (лейкоксеннизации) с возможным выносом титана подвергается даже такой относительно устойчивый титановый минерал, как ильменит. В дисперсных фракциях выветрелых продуктов происходит перераспределение титана и других элементов с последующим их захватом глинистыми минералами. При этом главную роль играет близость химических свойств элементов-гидролизатов, определяющая совместность их нахождения в растворах при гидролизе. Однако как в коре выветривания, так в глинах и бокситах значительная доля (до 40—80%) двуокиси титана по-прежнему связана с собственными минералами (главным образом, ильменитом), и это обстоятельство, как и для коренных пород, служит причиной ослабления корреляционных связей титана с другими элементами-гидролизатами. Тесная геохимическая связь титана с железом проявлена в самых верхних (латеритных) горизонтах коры выветривания и в бокситах. Основы такой связи закладываются уже в период формирования каолининовой коры выветривания.

Изучение поведения титана в исследованных бокситах дает определенный материал для понимания их происхождения. В этой связи следует отметить два установленных факта: 1) наследование бокситовым веществом титанового модуля, характерного для коры выветривания, и 2) тесную геохимическую связь титана с железом в бобовинах и титана с алюминием в цементе бокситов. Геологическая интерпретация этих фактов позволяет считать, что при формировании бокситов Барзасского района основная масса бокситового материала и минералов титана была переотложена из коры выветривания механическим путем. Совместно с данными по геологии отмеченные результаты в изучении поведения титана дают основания заключить, что исследованные бокситы имеют латеритно-осадочное происхождение. Таким образом, характер отношения  $TiO_2 : Al_2O_3$  в бокситах может служить геохимическим критерием при решении вопроса о механизме их образования [33].

Высокие концентрации титана в коре выветривания на изученных участках возникли благодаря следующим условиям.

1. Наличие богатого коренного источника и интенсивный вынос легкоподвижных элементов при его выветривании. При этом основная масса титана, содержащаяся в исходных породах (амфиболитах), находится в минеральной форме (главным образом в ильмените), устойчивой в условиях выветривания.

2. Механическое переотложение материала коры выветривания также способствовало дальнейшему обогащению его титаном (в форме ильменита, реже рутила) за счет выноса легких фракций, сложенных в основном глинистыми минералами.

Предлагаемый метод объемной магнитной сепарации позволяет извлекать практически полностью весь ильменит, содержащийся в выветрелых глинистых продуктах. Положительные результаты при испытании сконструированной обогатительной установки в промышленных условиях дадут реальную возможность перевести разведанные участки обогащенной титаноносной коры выветривания в разряд рентабельных для промышленной обработки.

В настоящее время главными источниками титана как в Советском Союзе, так и за рубежом являются россыпи (древние и современные, прибрежно-морские и аллювиальные) и коренные месторождения, связанные с основными породами. Коры выветривания как возможный источник титана из-за трудности в технологии обогащения обычно не обрабатываются. В литературе на этот счет имеются лишь данные Берга [7], указавшего, что титановые минералы из элювиальных продуктов добывают только в двух пунктах: в окрестностях горы Крауфорд.

(Crawford) около Аделаиды, где из богатых каолином глинистых продуктов выветривания вымывают рутил, и близ района Урбайн (St. Urbain) в Канаде, где из элювиальной россыпи, образовавшейся на габбро, извлекают рутил и ильменит.

Между тем титаноносные коры выветривания распространены не только в Западной Сибири, но и на обширных площадях Восточной Сибири и Дальнего Востока. Возможности их использования как сырья на титан исследователями намечены [22]. Поэтому представляется вероятным, что предлагаемый метод обогащения титаноносных кор выветривания откроет возможности вовлечь в сферу промышленного освоения и те запасы титана, которые связаны с глинистыми продуктами выветривания и которые находятся в районах с благоприятными географо-экономическими условиями для отработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Безруков П. Л., Янин А. Л. Юрские отложения и месторождения алюминиевых руд в Примугоджарских степях. Бокситы, т. I, ч. 1.—Труды Всес. н.-н. ин-та мин. сырья, 1937, вып. 110.
2. Бенеславский С. И. Титановые минералы в бокситах.—Изв. АН СССР, серия геол., 1953, № 2.
3. Бенеславский С. И. Минералогия осадочных бокситов.—В сб. «Бокситы, их минералогия и генезис». Изд-во АН СССР, 1958.
4. Бенеславский С. И., Герман-Галкина А. С. Получение глинозема из бокситов Татарского месторождения. Сырьевые ресурсы легких металлов Восточной Сибири.—Труды Вост.-Сиб. фил. АН СССР, 1958, I, вып. 12.
5. Бенеславский С. И. Вторичные процессы — важнейший фактор формирования бокситовых руд.—В сб. «Кора выветривания», вып. 4. Изд-во АН СССР, 1962.
6. Берестнева З. Я., Корецкая Г. А., Каргин В. А. Электронно-микроскопическое исследование  $TiO_2$  — зольей и механизм образования коллоидных частиц.—Коллоид. ж., 1950, 12, № 5.
7. Берг Г. Геохимия месторождений полезных ископаемых. М.—Л., ОНТИ, 1937.
8. Бобров К. Т. Связь коры выветривания на траппах с бокситообразованием.—В сб. «Кора выветривания», вып. 4. Изд-во АН СССР, 1962.
9. Богацкий В. В. О закономерностях размещения концентраций титана и особенностях его металлогении на примере Красноярского края.—В сб. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. 1. Изд-во АН СССР, 1958.
10. Боголепов К. В. К вопросу о стратиграфическом положении и генезисе бокситов Енисейского края.—В сб. «Бокситы, их минералогия и генезис». Изд-во АН СССР, 1958.
11. Боголепов К. В., Пельтек Е. М. Месторождения бокситов Красноярского края и перспективы бокситоносности. Сырьевые ресурсы легких металлов Восточной Сибири.—Труды Вост.-Сиб. фил. АН СССР, 1958, I, вып. 12.
12. Брадинская Е. М. К минералогии бокситов Татарского месторождения. Сырьевые ресурсы легких металлов Восточной Сибири.—Труды Вост.-Сиб. фил. АН СССР, 1958, I, вып. 12.
13. Брадинская Е. М. Минералы железа и титана в бокситах Енисейского края.—Записки Вост.-Сиб. отд. Всес. мин. об-ва, 1959, вып. 1.
14. Бушинский Г. И. О генетических типах бокситов.—В сб. «Бокситы, их минералогия и генезис». Изд-во АН СССР, 1958.
15. Бушинский Г. И. Титан в осадочном процессе.—Литол. и полезн. ископ., 1963, № 2.
16. Бушинский Г. И. О некоторых вопросах геологии бокситов.—Труды ГИН АН СССР, 1964, вып. 103.
17. Бушинский Г. И. Успехи изучения генезиса бокситов за последние десять лет (1955—1965 гг.).—В сб. «Генезис бокситов». Изд-во «Наука», 1966.
18. Великовская Е. М. Бокситы северо-восточного Казахстана (Акмолинский и прилегающие районы). Бокситы, т. I, ч. 2.—Труды Всес. н.-н. ин-та мин. сырья, 1936, вып. 111.
19. Вернадский В. И. Заметка о титане в биосфере. Избр. соч., т. V. Изд-во АН СССР, 1960.
20. Вертушков В. Н. Рутилсодержащие амфиболиты и эклогиты Урала.—Разведка и охрана недр, 1957, № 8.
21. Виноградов А. П. О причинах высокого содержания титана в бокситах.—Изв. АН СССР, серия геол., 1957, № 4.
22. Владимиров Б. М. К вопросам о возможном образовании месторождений железа и титана при выветривании траппов.—Труды Вост.-Сиб. фил. СО АН СССР, серия геол., 1958, вып. 14.
23. Волков А. Н. Бокситы Казахстана и их генезис.—В сб. «Бокситы, их минералогия и генезис». Изд-во АН СССР, 1958.
24. Гинзбург И. И., Кац А. А., Корин И. З. и др. Древняя кора выветривания на ультраосновных породах Урала, ч. 1. Типы и морфология древней коры выветривания.—Труды ГИН АН СССР, серия Уральск. компл. экспед., 1946, вып. 80, № 1.

25. Гинзбург И. И. Древняя кора выветривания на ультраосновных породах Урала, ч. 2. Геохимия и геология древней коры выветривания на Урале.— Труды ГИН АН СССР, серия Уральск. компл. экспед., 1947, вып. 81, № 2.
26. Гинзбург И. И. Некоторые физико-химические моменты в образовании глин.— В сб. «Исследование и использование глин». Изд-во Львовск. ун-та, 1958.
27. Гинзбург И. И., Наджакова Г. Э., Никитина А. П. Современное и древнее латеритное выветривание базальтов Бразилии и Русской платформы.— В сб. «Кора выветривания», вып. 4. Изд-во АН СССР, 1962.
28. Гипп С. К. Титан в бокситах Кайракского месторождения.— Докл. АН СССР, 1959, 126, № 4.
29. Гладковский А. К., Ушатинский И. Н. Замечания по книге «Бокситы, их минералогия и генезис».— Труды Ин-та геол. Уральск. фил. АН СССР, 1964, вып. 64.
30. Голосов С. И., Кларовский В. М., Молчанов В. И., Цибульчик В. М. Выделение слабомагнитных минералов из тонкозернистого материала кор выветривания методом объемной магнитной сепарации.— Ж. физ.-тех. проблемы разработки полезных ископаемых, 1968, № 2.
31. Гольберг А. В. Бокситы ливановских месторождений приуральной части Западно-Сибирской низменности.— Материалы по геол. и полезным ископ. Сибири, 1961, вып. 6.
32. Горецкий Ю. К. Закономерности в размещении бокситовых месторождений и условия их образования.— В сб. «Бокситы, их минералогия и генезис». Изд-во АН СССР, 1958.
33. Григорьев В. Н. Характер соотношения двуокиси титана и глинозема в породах некоторых бокситовых месторождений СССР.— Литол. и полезн. ископ., 1963, № 2.
34. Дорош В. М. Определение малых количеств ниобия в рудах, содержащих титан, вольфрам, молибден, хром.— Ж. анал. хим., 1961, 16, вып. 2.
35. Дорош В. М. Фотометрическое определение малых количеств тантала при помощи родомин.— Ж. анал. хим., 1963, 18, вып. 8.
36. Дядченко М. Г., Хатунцева А. Я. Стадийность процесса изменения ильменита в гипергенных условиях.— В кн. «Вопросы минералогии осадочных образований», кн. 6, 1961.
37. Ефимов И. А. Критерии поисков рутила в древних метаморфических толщах. Производительные силы Центрального Казахстана, т. 2, Алма-Ата, 1959.
38. Ефимов И. А. Генетическая классификация месторождений титана в древних метаморфических толщах.— В кн. «Очерки по металлогении осадочных пород». Изд-во АН СССР, 1961.
39. Жердева А. Н. Сравнительная характеристика ильменитов из россыпей.— Мин. сырье, 1961, вып. 2.
40. Залесский Б. В., Короткова О. Н. Объемный вес.— В кн. «Методы изучения осадочных пород», т. 1. Госгеолтехиздат, 1957.
41. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л., изд-во «Наука», 1967.
42. Зеленов К. К. Геохимия алюминия и титана в областях вулканической деятельности островных дуг.— Сов. геология, 1963, № 3.
43. Зив Е. Ф. Рутилизация ильменита в гипергенных условиях.— Изв. АН СССР, серия геол., 1956, № 12.
44. Знаменский Е. Б., Родионова Л. М., Кахана М. М. О распределении ниобия и тантала в гранитах.— Геохимия, 1957, № 3.
45. Казанский Ю. П. О распределении реликтовых минералов в профиле каолиновой коры выветривания.— Изв. высших учебных заведений, серия геол. и разведка, 1959, № 8.
46. Казаринов В. П. Мезозойские и кайнозойские отложения Западной Сибири. Гос-топтехиздат, 1958.
47. Калужный В. А. Погребенная кора выветривания диабазов и туффилов в эффузивно-осадочном горизонте ( $D_2^2$ ) и ее значение в накоплении железных руд.— В сб. «Кора выветривания», вып. 3. Изд-во АН СССР, 1960.
48. Клекль В. Н. Закономерности размещения и происхождение бокситов КМА.— В сб. «Генезис бокситов». Изд-во «Наука», 1966.
49. Коноваленко П. Н., Нестерович В. Н. Определение начала осаждения гидроокисей металлов методом полярографии и определение произведения растворимости гидроокисей титана и алюминия.— Укр. хим. ж., 1952, 8, вып. 6.
50. Кузьменко М. В. Тантал. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов, т. 1. Геохимия редких элементов. Изд-во «Наука», 1964.
51. Левченко С. В., Бобров Е. Т., Наседкина В. Х. Латеритная кора выветривания мезо-кайнозоя восточной части Алтае-Саянской области.— В сб. «Генезис бокситов». Изд-во «Наука», 1966.
52. Ли А. Ф., Гребенникова О. Т., Ясус Н. С. Микроструктуры ильменитов и их практическое значение.— Записки Вост.-Сиб. отд. Всес. мин. об-ва, 1959, вып. 1.
53. Лисицына Н. А. Глинистые продукты выветривания пород палеозоя и докембрия в бокситоносных районах северо-восточного Казахстана.— В сб. «Исследование и использование глин». Изд-во Львовск. ун-та, 1958.
54. Лисицына Н. А. Об условиях залегания кайнозойских континентальных бокситов

- западной части Казахского нагорья.— В сб. «Бокситы, их минералогия и генезис». Изд-во АН СССР, 1958.
55. *Лисицына Н. А., Пастухова М. В.* Вторичная минерализация в бокситовой толще и коре выветривания тургайских и северокавказских месторождений бокситов.— Геол. рудных месторожд., 1961, № 1.
  56. *Лисицына Н. А.* О гиббситоносной коре выветривания Батумского побережья Кавказа.— В сб. «Кора выветривания», вып. 4. Изд-во АН СССР, 1962.
  57. *Лисицына Н. А., Пастухова М. В.* Соотношения двуокиси титана и глинозема в платформенных бокситах.— Литол. и полезные ископ., 1963, № 2.
  58. *Лисицына Н. А., Пастухова М. В.* Структурные типы мезо-кайнозойских бокситов Казахстана и Западной Сибири.— Труды ГИН АН СССР, 1963, вып. 95.
  59. *Лисицына Н. А., Пастухова М. В.* О роли вторичных процессов в формировании платформенных бокситов. Вопросы геохимии и геологии бокситов.— Труды ГИН АН СССР, 1964, вып. 103.
  60. *Лисицына Н. А., Пастухова М. В.* К вопросу о генезисе латеритных и латеритно-осадочных бокситов. Латериты.— В сб. «Доклады сов. геологов на XXII сессии МГК. Проблема 14». Изд-во «Недра», 1964.
  61. *Лисицына Н. А.* Особенности распределения и формы нахождения титана в коре выветривания основных пород.— Литол. и полезные ископ., 1965, № 4.
  62. *Лисицына Н. А.* К методике геохимического изучения кор выветривания.— Литол. и полезные ископ., 1966, № 1.
  63. *Лоугэн Ф. К.* Некоторые вопросы выветривания силикатных минералов.— В сб. «Вопросы геологии и минералогии бокситов». Изд-во «Мир», 1964.
  64. *Малышев И. И.* Закономерности образования и размещения месторождений титановых руд. Госгеолтехиздат, 1957.
  65. *Матвеева Ф. А.* Высокоглиноземистые глины Барзасского месторождения, сообщ. 1. Физико-химическая характеристика глин.— Труды Хим.-метал. ин-та, 1961, вып. 17.
  66. *Матвеева Ф. А., Мелехова Т. Ф.* Высокоглиноземистые глины Барзасского месторождения, сообщ. 2. Получение высокоглиноземистых огнеупоров.— Труды Хим.-метал. ин-та, 1961, вып. 17.
  67. *Меняйлов А. А.* Латеритный гил кор выветривания на траппах Сибирской плагформы. Латериты.— В сб. «Доклады сов. геологов на XXII сессии МГК. Проблема 14». Изд-во «Недра», 1964.
  68. *Мигдисов А. А.* О соотношении титана и алюминия в осадочных породах.— Геохимия, 1960, № 2.
  69. *Мигдисов А. А.* Геохимия титана в гумидном бассейне осадконакопления. Химия земной коры, т. I. Изд-во АН СССР, 1963.
  70. *Михайлов Б. М.* Некоторые вопросы геохимии древней коры выветривания.— В сб. «Исследование и использование глин». Изд-во Львовск. ун-та, 1958.
  71. *Михайлов Б. М.* Бокситы западных районов Либерийского щита.— В сб. «Генезис бокситов». Изд-во «Наука», 1966.
  72. *Момджи Г. С.* Теоретические основы и методика поисков россыпных месторождений титана и циркония.— В кн. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. IV. Изд-во АН СССР, 1960.
  73. *Немцович В. М.* Некоторые особенности образования метаморфогенных Ti- и Fe—Ti-концентраций.— Геол. рудных месторожд., 1966, 8, № 5.
  74. *Нестеренко Г. В., Криворотенко А. Н., Цибульчик В. М.* Генезис и источники питания тяжелыми минералами песчано-галечных отложений кийской свиты (нижний мел).— Геол. и геофиз., 1963, № 5.
  75. *Нестеренко Г. В., Цибульчик В. М.* Титаноносность мезозойских и третичных отложений юго-западной окраины Чулымо-Енисейской впадины.— В сб. «Геология и геохимия рудных месторождений Сибири». Новосибирск, 1965.
  76. *Нестеренко Г. В., Цибульчик В. М.* Источники питания титаноносных отложений на юго-востоке Западной Сибири. Новосибирск, 1966.
  77. *Никитин К. К.* Кора выветривания на диоритах Южного Урала.— В сб. «Кора выветривания», вып. 2. Изд-во АН СССР, 1956.
  78. *Никитина А. П.* Каолинизация и бемитизация в коре выветривания хлоритовых сланцев Яковлевского месторождения КМА.— В сб. «Исследование и использование глин». Изд-во Львовск. ун-та, 1958.
  79. *Никитина А. П.* Древняя латеритная кора выветривания докембрийских пород Воронежской антеклизы. Латериты.— В сб. «Доклады сов. геологов на XXII сессии МГК. Проблема 14». Изд-во «Недра», 1964.
  80. *Никитина А. П.* Древняя кора выветривания кристаллического фундамента Воронежской антеклизы и ее бокситоносность. Изд-во «Наука», 1968.
  81. *Новиков В. А.* Гранулометрическое разделение материала коры выветривания.— В сб. «Кора выветривания», вып. 1. Изд-во АН СССР, 1952.
  82. *Панфилова А. В., Иванничева Е. Г.* К химии титана. О полиморфных структурах двуокиси титана.— Ж. орг. химии, 1939, 9, вып. 19.
  83. *Пастухова М. В.* К вопросу о распределении  $TiO_2$  в платформенных бокситах Тургайского прогиба.— Литол. и полезные ископ., 1965, № 4.
  84. *Пачаджанов Д. Н.* К геохимии ниобия и тантала в глинах.— Геохимия, 1963, № 10.

85. *Пачаджанов Д. Н.* Геохимическая связь тантала, ниобия и титана в глинах.— *Геохимия*, 1964, № 9.
86. *Петров В. П.* Основы учения о древних корах выветривания. Изд-во «Недра», 1967.
87. *Плохинский Н. А.* Биометрия. Новосибирск, 1961.
88. *Полюнов Б. Б.* Кора выветривания, ч. 1. Л., Изд-во АН СССР, 1934.
89. *Полюнов Б. Б., Тумилович Л. Б.* Титан в коре выветривания.— В кн. «Академику В. И. Вернадскому к 50-летию научной и педагогической деятельности». Изд-во АН СССР, 1936.
90. *Поляков А. И., Вольнец М. П.* Фотокалориметрическое определение Th с арсеназо III с хроматографическим отделением мешающих элементов на КУ-2.— *Геохимия*, 1961, № 5.
91. *Поморцева Е. Н.* Высокоглиноземистые глины Барзасского месторождения, сообщ. 5. Промышленный опыт получения огнеупоров и их испытания в условиях службы. Новосибирск, 1961.
92. *Пономарев А. И.* Методы химического анализа минералов и горных пород.— *Труды ИГН АН СССР*, 1951.
93. *Попов Ю. Г., Бессолицын Е. П.* Бокситоподобные породы докембрия восточной окраины Патомского нагорья.— В сб. «Генезис бокситов». Изд-во «Наука», 1966.
94. *Пришл Р.* Комплексоны в химическом анализе. ИЛ, 1955.
95. *Рабокова З. К.* Ангренское каолино-угольное месторождение.— В сб. «Кора выветривания», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1963.
96. *Разумова В. Н.* Кора выветривания северо-западной части Казахского нагорья.— В сб. «Кора выветривания», вып. 2. Изд-во АН СССР, 1956.
97. *Разумова В. Н.* Гиббситоносные коры выветривания основных пород.— В сб. «Генезис бокситов». Изд-во «Наука», 1966.
98. *Рамдор П.* Рудные минералы и их сростания. ИЛ, 1962.
99. *Рожкова Е. В., Соболева М. В.* Минералогия и условия образования бобовых железно-алюминиевых руд. Бокситы, т. I, ч. 2.— *Труды Всес. н.-и. ин-та мин. сырья*, 1936, вып. III.
100. *Ронов А. Б., Ратынский В. М.* Методы установленных средних проб.— *Докл. АН СССР*, 1952, 86, № 4.
101. *Ронов А. Б., Мигдисов А. А.* Соотношение кларковых и рудных концентраций алюминия в осадочном цикле.— В сб. «Доклады сов. геологов на XXI сессии МГК. Проблема I». Госгеолтехиздат, 1960.
102. *Ронов А. Б.* Общие тенденции в эволюции состава земной коры, океана и атмосферы.— *Геохимия*, 1964, № 8.
103. *Ронов А. Б., Мигдисов А. А.* Основные черты геохимии элементов-гидролизатов в процессах выветривания и осадконакопления.— *Геохимия*, 1965, № 2.
104. *Рухин Л. Б.* Гранулометрический анализ рыхлых и слабо спемантированных осадочных пород.— В сб. «Методы изучения осадочных пород», т. I, гл. V. Госгеолтехиздат, 1957.
105. *Сердюченко Д. П.* Минералы бора и титана в некоторых осадочно-метаморфических породах.— *Труды Геол. ин-та АН СССР*, 1956, вып. 5.
106. *Слукин А. Д.* Древние коры выветривания и связанные с ними бокситы в одном районе Сибирской платформы.— В сб. «Генезис бокситов». Изд-во «Наука», 1966.
107. *Соколов Г. А., Павлов Д. И.* К геохимии титана в метасоматических процессах.— *Докл. АН СССР*, 1962, 142, вып. 5.
108. *Спирин С. Л., Пасова Ф. Г.* Закономерности размещения и литологический состав бокситоносных отложений в юго-западной части Чулымо-Енисейской впадины.— В сб. «Минеральное сырье», вып. I. М., 1960.
109. *Страхов Н. М.* Основы теории литогенеза, т. I, II. Изд-во АН СССР, 1962.
110. *Страхов Н. М.* О значении титанового модуля для познания генезиса бокситов.— *Литол. и полезные ископ.*, 1963, № 2.
111. *Сухарина А. Н., Емельянова Д. И.* Новые данные по геологии и полезным ископаемым мезозойских отложений бассейна р. Золотой Китат.— *Вестник Зап.-Сиб. и Новосиб. геол. учр-ний*, 1958, вып. 3.
112. *Сухарина А. Н.* Золотокиятская (Барзасская) элювиальная россыпь ильменита в Кузнецком Алатау.— В кн. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. IV. Изд-во АН СССР, 1960.
113. *Сухарина А. Н., Петропольская А. А.* Новый район с высокоглиноземистыми огнеупорными глинами в Западной Сибири.— *Сов. геология*, 1960, № 10.
114. *Таусон Л. В.* Геохимия редких элементов в гранитоидах. Изд-во АН СССР, 1961.
115. *Трубина К. Н.* Древняя латеритная кора выветривания в районе Северо-Онежских месторождений бокситов.— В сб. «Бокситы, их минералогия и генезис». Изд-во АН СССР, 1958.
116. *Трубина К. Н.* Парагенезис титана и алюминия в корах выветривания и продуктах их переотложения.— *Литол. и полезные ископ.*, 1963, № 2.
117. *Федоров Б. М.* Условия залегания и генезис мезозойских бокситов Среднего Урала. Бокситы, т. I, ч. 1.— *Труды Всес. н.-и. ин-та мин. сырья*, 1937, вып. 110.
118. *Хализова В. А., Алексеева А. Я., Смирнова Е. П.* Ускоренный метод анализа сл-

- ликатных пород, основанный на применении ионного обмена и комплексометрии.— В сб. «Методы анализа минерального сырья». Госгеолтехиздат, 1964.
119. *Хорошева Д. П.* Минералогия и геохимия бокситового горизонта Среднего Приднепровья.— В сб. «Генезис бокситов». Изд-во «Наука», 1966.
  120. *Цибульчик В. М., Нестеренко Г. В.* Изменение ильменита, магнетита и титаномагнетита в гипергенных условиях.— В сб. «Геология и геохимия рудных месторождений Сибири». Новосибирск, 1965.
  121. *Штрунц Х.* Минералогические таблицы. Госгортехиздат, 1962.
  122. *ШигOLEV Б. М.* Математические обработки наблюдений. Госиздат физ.-мат. литры, 1962.
  123. *Яковлева М. Н.* О геохимии Al, Si, Ti и Fe в условиях сернокислотного выветривания в связи с вопросом об условиях образования бокситовых руд.— Бюл. МОИП, отд. геол., 1956, **31**, вып. 4.
  124. *Яковлева М. Н.* Об аллитной коре выветривания во влажных субтропиках Закавказья.— В сб. «Исследование и использование глин». Изд-во Львовск. ун-та, 1958.
  125. *Яковлева М. Н.* О геохимии алюминия, титана, железа и кремния в условиях сернокислотного выветривания (в связи с вопросом о происхождении боксита).— В сб. «Бокситы, их минералогия и генезис». Изд-во АН СССР, 1958.
  126. *Янковский В. А.* Минералы титана из туганских слоев.— Вестник Зап.-Сиб. и Новосибир. геол. упр-ний, 1958, вып. 3.
  127. *Янулов К. Н., Чулкова И. В.* Ориентированные псевдоморфозы рутила по ильмениту.— Докл. АН СССР, 1961, **140**, № 1.
  128. *Baily S. W., Cameron E. N., Spedden H. R., Weege H. R.* The alteration of ilmenite beach sands.— Econ. Geol., 1956, **51**.
  129. *Carrol D.* Ilmenite alteration under reducing conditions in unconsolidated sediments.— Econ. Geol., 1966, **55**, N 3.
  130. *Gordon M. Jr., Murata K. J.* Minor elements in Arkansas bauxite.— Econ. Geol., 1952, **47**.
  131. *Flinter B. H.* Malayan ilmenite and arisonite.— Econ. Geol., 1960, **55**.
  132. *Flinter B. H.* The alteration of ilmenite and question about «arisonite».— Econ. Geol., 1959, **54**, N 4.
  133. *Hartman J. A.* Titanium mineralogy of certain bauxites and their parent materials.— Econ. Geol., 1959, **54**, N 4.
  134. *Karkhanavala M. D.* The Nature of arisonite.— Econ. Geol., 1959, **54**, N 7.
  135. *Karkhanavala M. D., Momin A. S.* The alteration of ilmenite.— Econ. Geol., 1959, **54**, N 3.
  136. *Karkhanavala M. D.* Alteration of ilmenite and arisonite.— Econ. Geol., 1960, **55**, N 4.
  137. *Lyng L. E.* Alteration of ilmenite.— Econ. Geol., 1960, **55**, N 5.
  138. *Schossberger F.* Uber die Umwandlung des Titandioxides. Zeitschr.— Kristallographie, 1942, **104**.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	3
Глава I. История исследований и постановка вопроса	5
Глава II. Методика исследований	15
Глава III. Общие сведения по геологии района	17
Глава IV. Распространение, строение и условия залегания коры выветривания и продуктов ее переотложения	23
Глава V. Распределение титана в коренных породах района	42
Глава VI. Поведение титана в коре выветривания коренных пород	59
Глава VII. Особенности распределения титана в продуктах переотложения коры выветривания — бокситах и глинах	107
Глава VIII. Возможности образования высоких концентраций титана в коре выветривания района и их промышленное использование	123
Заключение	128
Литература	131

*Вадим Михайлович Цибульчик*

### **Поведение титана в коре выветривания метаморфических пород**

Утверждено к печати Институтом геологии и геофизики  
Сибирского отделения АН СССР

Редактор издательства *М. И. Азизян*  
Художественный редактор *С. А. Литвак*  
Технические редакторы *В. Д. Прилепская* и *Л. И. Курпирянова*

Сдано в набор 1/X 1971 г. Подп. к печ. 21/XII 1971 г. Формат 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага № 2.  
Усл. печ. л. 11,9. Уч.-изд. л. 10,9. Тираж 900 экз. Т-20156. Тип. зак. 4773

*Цена 1 р. 00 к.*

Издательство «Наука». Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука». Москва, Г-99, Шубинский пер., 10