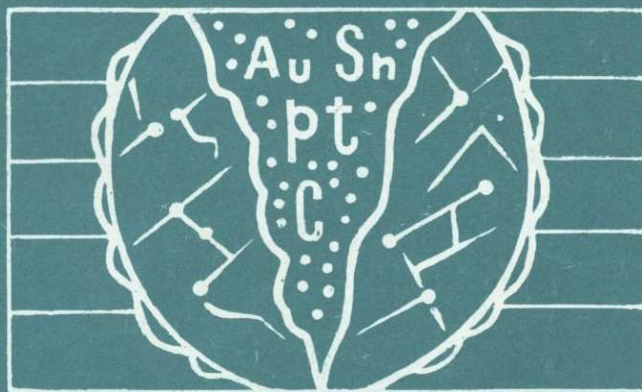


Ю.В. ШУМИЛОВ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
И ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ  
ФАКТОРЫ  
РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЯ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт

---

Ю.В. ШУМИЛОВ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
И ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ  
ФАКТОРЫ  
РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЯ

---

3684



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"  
Москва 1981



Ю.В. Шумилов. Физико-химические и литогенетические факторы россыпепобразования. М.: Наука, 1981 г.

Рассмотрены физико-химические условия формирования россыпей в зависимости от минералогического и химического состава рудных тел россыпепобразующих формаций золота, олова, платины и алмазов. На основе экспериментов по физическому и химическому выветриванию рудного вещества предложено решение проблемы выветривания в геологии россыпей. Выдвигается положение о решающей роли в формировании азональных россыпей эрозивной деятельности водных потоков, осуществляющих размыв коренных источников и концентрацию минералов вне зависимости от климата. Охарактеризованы гравитационно-диффузионный, сегрегационный, миграционно-остаточный, миграционный и суффозионно-остаточный механизмы концентрации россыпепобразующих минералов. На основе комплексного анализа экспериментальных и геологических данных предложены литогенетические критерии геологической проспекции россыпных месторождений в сложных условиях залегания — в дельтах, зонах равнинного и низменного рельефа. Ил. 69. Табл. 46. Библ. 239.

Ответственный редактор  
академик Н.А. ШИЛО

## ВВЕДЕНИЕ

В комплексе геологических наук, исследующих проблемы создания надежной минерально-сырьевой базы для развития народного хозяйства нашей страны, геологии россыпей принадлежит далеко не последнее место. Известно, что именно открытие россыпных месторождений нередко определяют географию экономического освоения многих районов СССР и других стран. Одним из наиболее ярких примеров в этом отношении является Северо-Восток нашей страны, где в течение всего нескольких десятилетий на базе россыпных месторождений был сформирован горнопромышленный облик целого региона и осуществляется дальнейшее развитие горнодобывающей промышленности.

Россыпные месторождения занимают в настоящее время ведущее положение в мировой структуре добываемого минерального сырья (в %): золота (75–80), титана (70–80), олова (70), циркона (95–100), алмазов (75–85), вольфрама (35), монацита и ксенотима (20–35), колумбита и танталита (25–35) [180]. Оставаясь одним из наиболее экономически выгодных источников минерального сырья, россыпные месторождения сохраняют эту роль и в будущем. Несомненно, что развитие горной промышленности приведет к созданию новых технологических схем, сделавших возможным использование сырья с низкими содержаниями полезных компонентов и в таких формах их нахождения, которые сегодня являются недоступными. Помимо своего утилитарного значения в качестве минеральных месторождений, россыпи являются важнейшим информативным источником данных для поисков коренных месторождений, анализа процессов континентального литогенеза и эволюции терригенного материала на поверхности Земли в целом, а также для использования экзогенного чехла планеты при решении многих других задач.

Несмотря на бесспорно большое значение россыпных месторождений для геологической теории и практики, Н.П. Херасков еще в 1960 г. констатировал, что геология россыпей является самой неизученной областью науки о рудных месторождениях. Хотя со времени 60-х годов геология россыпей пополнилась огромным фактическим материалом, ее основные положения к настоящему времени хорошо разработаны и стали своего рода геологической классикой [9, 151], все же некоторые кардинальные вопросы россыпеобразования остаются решенными на уровне не более чем удовлетворительных гипотез [151]. Такому положению дел способствовало издавна сложившееся превратное мнение о россыпях как о весьма простых геологических образо-

ваниях. При этом не учитывалось, что, действительно будучи такими в качестве природных материальных объектов, т.е. обособленных в трехмерном пространстве геологических тел, россыпные месторождения имеют еще четвертое измерение, являясь продуктом сложной и длительной эволюции вещества в земной коре, начальные звенья которой относятся к рудогенному процессу, а конечные — к разрушению коренных источников в условиях земной поверхности. Именно принадлежность россыпеобразования к неразрывной цепи геологических превращений рудного вещества создает фундаментальную теоретическую базу для рассмотрения россыпных месторождений не в качестве скоплений тех или иных минералов вследствие элементарных физико-механических процессов, а выдвигает объективную научную задачу познания россыпей как результата морфо- и литогенетических процессов, накладывающихся на металлогенический фон верхних структурных этажей земной коры.

Основоположник науки о россыпях Ю.А. Билибин создал в свое время весьма стройную в формально-логическом отношении схему россыпеобразования. Однако, ограничив рассмотрение вопроса рамками речной долины, и даже, более того, сферой руслового потока, Ю.А. Билибин ограничил тем самым и контуры геологии россыпей как научной дисциплины. Оторванность теории россыпеобразования от тектоно-геоморфологических, металлогенических и историко-геологических представлений была впервые преодолена в работах Н.А. Шило, выдвинувшего также задачу развития геологии россыпей не только на уровне регионально-сравнительных обобщений, но и на основе современных физико-химических данных [199]. Решение этой задачи потребовало поиска новых направлений и подходов в исследовании традиционных проблем геологии россыпей, особенно в связи с тем, что ныне без теории строения вещества немислимо развитие самых разнообразных областей науки и техники — от астрономии до сельского хозяйства [54]. Геология россыпей не является в этом отношении исключением. Будучи одним из разделов геологии полезных ископаемых, в настоящее время геология россыпей перерастает в самостоятельное учение, развивающееся на стыке геохимии, теории континентального литогенеза и ряда других научных дисциплин. Именно этим обусловлена необходимость дальнейшего формирования учения о россыпях не только на основе обширного фактического материала, получаемого при разведке и эксплуатации россыпных месторождений, но и главным образом на основе синтеза знаний, которыми располагают питающие геологию россыпей науки.

Исследования, по материалам которых написана эта книга, начаты более 10 лет назад в развитие решений VIII Всесоюзного литологического совещания (Москва, 1968 г.), подчеркнувшего настоятельную необходимость изучения хода и форм проявления осадочной дифференциации и связанного с ней образования россыпных концентраций полезных минералов [156]. Однако по мере проведения исследований в этом направлении становилась все более очевидной невозможность достаточно полного охвата в рамках одной работы всех аспектов теории россыпеобразования. Поэтому постепенно обособи-

лось направление исследований, пересекающее узловые проблемы формирования россыпных месторождений: выветривание рудного вещества, высвобождение из него ценных минералов, механизмы поведения минералов в русловых потоках. Именно это направление исследований привело нас к необходимости анализа процессов россыпеобразования прежде всего с физико-химических и литогенетических позиций. Следует иметь в виду также, что до настоящего времени большинство исследований по геологии россыпей затрагивало только какой-то минеральный тип месторождений (золота, олова, алмазов и т.д.). Это приводило к определенной фрагментарности наших знаний о россыпных месторождениях, хотя и различающихся по минеральному признаку, но принадлежащих к единым генетическим типам с точки зрения теории континентального литогенеза. В этой связи перед нами встала задача сравнить различные минеральные типы, чтобы оценить специфические особенности россыпей, определяемые их разной минеральной принадлежностью.

В качестве объекта изучения были выбраны россыпные месторождения золота, олова, платины и алмазов. Эти минералы имеют весьма важное промышленное значение, и, кроме того, они охватывают почти весь спектр россыпеобразующих минералов в отношении их физико-механических и химических свойств (удельного веса, твердости, инертности). Коренные источники этих россыпеобразующих минералов также образуют длинный ряд разнотипных по своему вещественному составу и формационной принадлежности первичных рудных тел, питающих россыпи. Следовательно, изучение физико-химических и литогенетических особенностей формирования россыпных месторождений золота, олова, платины и алмазов позволяет увидеть черты как сходства в образовании этих минеральных типов россыпей, так и отличия, что дает представление и о закономерностях формирования россыпей всех других минералов, занимающих промежуточное положение по отношению к изученным нами. Выбранный подход позволяет отчетливее выявить россыпеобразующее значение тех факторов россыпеобразования, которые не связаны со свойствами самих минералов, а зависят от внешних условий формирования россыпей. Естественно, что общая направленность данной работы на изучение физико-химических и литогенетических факторов россыпеобразования потребовала широкого использования экспериментальных методов в сочетании с комплексом полевых наблюдений, стационарных и экспедиционных исследований, проводившихся в различных климатических и металлогенетических зонах нашей страны.

Следует особо подчеркнуть, что в данной книге автор не стремился к систематизированному изложению теории россыпеобразования. Однако вполне понятно, что в процессе работы над книгой и при изложении полученных результатов потребовалось как охарактеризовать общий фон современного состояния геологии россыпей в качестве основы наших исследований, так и увязать новые представления с предшествующими работами. В целом данную книгу можно рассматривать как попытку дополнить общую геологию россыпей специальным разделом, отражающим физико-химические и литогенетические факторы,

условия и механизмы россыпеобразования. При этом также понятно, что в основе теоретических разработок должны лежать корректные исходные данные о факторах, действию которых подчиняется геологический процесс формирования россыпных месторождений. Известно, что из-за неоднозначной трактовки одних и тех же геологических явлений и факторов, их порождающих, подчас возникали длительные дискуссии, уводящие исследователей далеко в сторону от сущности обсуждаемого вопроса. Поэтому мы сочли наиболее целесообразным основной упор в данной работе сделать на анализ факторов россыпеобразования, стремясь придать их характеристике по возможности количественное содержание, что открывает перспективы воспроизведения наших результатов в экспериментах других исследователей, уточнения и детализации в ходе дальнейших работ.

В процессе исследований мы осуществляли сотрудничество или обмен мнениями со многими коллегами из научно-исследовательских и производственных геологических организаций Москвы, Ленинграда, Риги, Киева, Казани, Перми, Иркутска, Новосибирска, Якутска, Владивостока, Магадана и других городов страны. Всем специалистам, мнения и консультации которых способствовали проведению исследований, автор выражает глубокую признательность. Автор благодарит также сотрудников лаборатории литогенетических проблем россыпеобразования СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, участвовавших в проведении исследований и подготовке книги.

## ГЛАВА I ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

На определенном этапе развития любой научной дисциплины становится необходимым хотя бы в самых основных чертах осмыслить историю формирования научных знаний. При всех недостатках и возможных пробелах такой ретроспективный анализ позволяет яснее увидеть тенденции развития научной дисциплины и правильнее оценивать ее соответствие выдвигаемым жизнью проблемам, современному уровню научно-технического прогресса. Исходя из этих соображений, нам представлялось полезным дать беглый обзор состояния сложившихся в науке о россыпях проблем.

### ЭТАПЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ГЕОЛОГИИ РОССЫПЕЙ

Первые представления о россыпях начали формироваться еще на заре цивилизации. Этот период трудно уложить в какие-либо исторические рамки за неимением документальных свидетельств о способах обнаружения и добычи ценных минералов. Однако исследователи единодушны в том, что первое золото и "белое золото" — платина [8], добытые или случайно найденные человеком, были россыпными. Первые, по крайней мере в России, теоретические обобщения в области геологии россыпей принадлежат М.В. Ломоносову. С гениальной лаконичностью излагал он более 200 лет назад сущность процессов образования россыпей золота: "Итак, никто не почтет сего невозможным, что золотые зерна из рудной жилы каким-нибудь насильством природы оторваны и между песком рассеяны. Сему присовокупляют силу и важность отломки камня кварца, сросшиеся с золотыми зернами, в песке находящиеся, явно уверяя, что песковое золото в жилах родилось. Ибо жилы, чистое золото содержащие, почти всегда состоят из кварца" [81, с. 334]. И автор делает первый в своем роде металлогенический прогноз: "... уповательно, что в толиком множестве рек, протекающих в различных местах по России, сыщется песчаная золотая руда, которая служить будет признаком, что вверху той реки надлежит действительно быть золотой руде в жилах" [81, с. 349].

Важный этап становления науки о россыпях, который можно назвать периодом научно обоснованных практических открытий россыпных месторождений, связан с трудами талантливой русского специалиста горного дела Л.И. Брусницына, открывшего россыпное зо-

лото в долине речки Березовки (Березовское рудное поле) в 1814 г., т.е. примерно через 50 лет после теоретических предсказаний М.В. Ломоносова. Вслед за открытием россыпей в России многие районы мира захлестнула волна как научно обоснованного открывательства, так и стихийного проспекторства. Начиная с 1814 г. в течение примерно 50–60 лет были выявлены почти все основные золотоносные районы мира и осуществлялась интенсивная добыча золота из россыпей, а также платины и некоторых других ценных минералов. В этот период появилось сравнительно мало теоретических обобщений [154, 224, 228, 232 и др.]. Развитие геологии россыпей длительное время шло главным образом по линии накопления все новых фактических данных о строении россыпных месторождений, условиях их залегания, вещественном составе и т.д. Первым вполне научным трудом, в котором не только дано описание строения россыпей, но и раскрыты геологические процессы, приводящие к образованию месторождений, стала классическая книга Ю.А. Билибина [9]. Появление такой работы именно в нашей стране предопределено плановым и развернувшимся в широких масштабах изучением эндогенной и экзогенной золотоносности до того времени практически не изученной территории Северо-Востока СССР. Основные положения геологии россыпей, сформулированные Ю.А. Билибиным, быстро завоевали широкую популярность среди практических геологов и на несколько десятилетий явились теоретической основой для выявления россыпей в восточных районах нашей страны.

Однако, как уже отмечалось выше, Ю.А. Билибин основное внимание уделил в своей работе характеристике процессов перемыва, переноса и переотложения ранее образованных россыпей в пределах речной долины. Остались слабо освещенными коренные источники ценных минералов, закономерности выветривания рудных тел, высвобождения минералов, роль климатических факторов, значение тектоно-геоморфологической эволюции металлогенических провинций и т.д. Прознававшаяся и самим Ю.А. Билибиным незавершенность созданных основ геологии россыпей стала к началу 50-х годов остро ощущаться в теоретических вопросах, а на практике приводила к снижению эффективности поисково-разведочных работ на россыпи в отдельных золотоносных районах страны. Другой причиной этой своеобразной кризисной ситуации в науке о россыпях к началу 60-х годов было то, что Ю.А. Билибин при разработке основ геологии россыпей использовал ту теоретическую базу, которая имела к началу 30-х годов в смежных науках (учение о корях выветривания, гидрологии, геоморфологии, четвертичной геологии и т.д.). Однако за 15–20 лет, прошедших во времени выхода книги Ю.А. Билибина, т.е. в середине 50-х годов, в советской науке были выдвинуты новые идеи, оказавшие глубокое воздействие на формирование теоретических представлений и прикладных разработок в области геологии россыпей [188, 72, 55, 56 и др.]. Происходило формирование морфо-структурной концепции [29, 93] и основных положений неотектоники [103, 209, 100]. Практически в этот же период складывались и были завершены основы теории литогенеза [159].

Новый уровень теоретических представлений, а также огромный объем непрерывно поступающих геологических фактов, не всегда соответствовавших положениям Ю.А.Билибина, остро поставили вопрос о необходимости расширения методологической базы геологии россыпей. Эта задача в наиболее завершеном и цельном виде решена работами Н.А. Шило [196, 197, 200-202 и др.]. Именно благодаря этим работам, содержащим как обобщающие, так и некоторые принципиально новые положения, геология россыпей стала превращаться в науку о формировании россыпных месторождений как продукта историко-геологической, металлогенической и тектоно-геоморфологической эволюции определенных магматических зон, а также как результата специфических литогенетических процессов.

Расширение методологической основы геологии россыпей и начавшаяся дифференциация знаний по проблеме россыпеобразования поставили вопрос о принадлежности науки о россыпях к тем или иным разделам геологии вообще. В практическом плане этот вопрос сомнений не вызывал: геология россыпей органически принадлежит геологии полезных ископаемых (в том ее виде, как она создана В.И. Смирновым). В то же время выявилась необходимость дальнейшего развития геологии россыпей на теоретической базе одной из геологических наук, предмет и цели которой ближе всего совпадают с содержанием науки о россыпях. После появления фундаментальных трудов Н.М. Страхова по теории литогенеза и проведения II Всесоюзного совещания по геологии россыпей (Москва, 1964 г.) стало ясно, что роль такой базисной науки для геологии россыпей должна играть теория континентального литогенеза, синтезирующая комплекс данных об эволюции горных пород (в том числе и руд) на земной поверхности в зонах мобилизации обломочного материала, на путях его транзита и аккумуляции в конечных водоемах стока. Высказанное представление о том, что теоретический базис геологии россыпей следует относить к литологической науке, находит подтверждение в решениях VIII Всесоюзного литологического совещания, обстоятельно проанализировавшего состояние теории континентального литогенеза в целом и россыпеобразования в частности [156]. За время, прошедшее после совещания, завершены крупные исследования, которые в значительной степени восполняют пробелы в теории континентального литогенеза и отдельных ее разделах (работы Б.С. Лунева, Н.В. Разумихина, А.А. Чистякова, И.П. Карташова и др.). На русском языке опубликованы фундаментальные труды зарубежных исследователей [27 и др.]. В целом же современное состояние геологии россыпей характеризуется тенденцией к детализации и углублению ранее выдвинутых положений, специализации исследований и их дифференциацией на несколько основных направлений: историко-геологическое, морфотектоническое, морфодинамическое, пространственно-генетическое, минералогическое, экспериментально-геоморфологическое, технико-методическое, прогнозно-металлогеническое.

Историко-геологическое направление, в том числе проблема историзма и геологической преемственности россыпей, принад-

лежит к основным аспектам россыпной геологии. Ее решением занимались многие исследователи, и вопросы возраста россыпей продолжают привлекать внимание и постоянно уточняются на материалах по отдельным регионам [19, 52, 33, 143, 124, 197].

Морфотектоническое направление нацелено на выявление закономерностей россыпеобразования в связи с морфоструктурными особенностями территории, направленностью и темпом тектоно-геоморфологической эволюции металлогенических провинций в целом и россыпеобразующих рудных формаций в частности [200, 55, 18 и др.]. В последние годы морфотектоническое направление как база изучения россыпей успешно развивается дальневосточными геологами (работы Г.И. Худякова и др.).

Морфодинамическое направление изучает россыпные месторождения как результат динамического взаимодействия россыпеобразующих факторов на склоне, в русле, волно-прибойной зоне в зависимости от меняющихся параметров: крутизны склона, гидравлических особенностей русла или береговой зоны моря, литологических характеристик отложений и т.д. Динамическое направление в исследовании аллювиальных россыпей зародилось под влиянием идей В.В. Ламакина и получило развитие в работах И.П. Карташова [55, 56, 58]. Среди последних публикаций такого плана интересны работа Б.В. Рьжова [138], материалы И.Э. Логиновой [80], а также результаты, полученные В.Л. Сухорословым по морфодинамическим условиям формирования прибрежных россыпей на Чукотке.

Пространственно-генетические связи коренных рудных источников с россыпями являются также одной из важнейших сторон россыпеобразования. Эта проблема рассматривалась Г.П. Воляровичем, И.С. Рожковым, Н.А. Шило и другими исследователями. При этом по мере углубления и детализации исследований связи россыпей с коренными источниками стали рассматриваться в двух направлениях. Первое, развиваемое Н.А. Шило в виде концепции о россыпеобразующих рудных формациях [201], рассматривает связи россыпей с питающими источниками на фоне структурно-магматических и металлогенических особенностей регионов, тектоно-геоморфологической эволюции рудных зон и главных особенностей вещественного состава коренных источников. Второе направление в изучении пространственно-генетических связей эндогенной и экзогенной минерализации получило развитие в исследованиях Ю.Н. Трушкова и его сотрудников [169, 170, 149]. Их подход состоит в поисках детерминированных связей между конкретными рудными телами и концентрациями минералов в россыпях. При этом используется комплекс геологических данных и математический аппарат для расчета пространственных соотношений в системе источник - россыпь. Близкие цели имеют математические и геохимические модели россыпеобразования [118].

Минералогическое изучение россыпных месторождений является одним из самых перспективных. Наиболее крупные работы по минералогии россыпей принадлежат А.А. Кухаренко [71], Н.А. Шило [198], В.С. Трофимову [168]. Новейшие данные по вещественному

составу россыпей [101, 45] также свидетельствуют о растущем интересе к минералогическим исследованиям в области россыпной геологии.

Экспериментально-геоморфологическое направление в геологии россыпей получило развитие в нашей стране с начала 60-х годов благодаря усилиям Н.И. Маккавеева, Н.В. Хмелевой, Н.В. Разумихина и ряда других исследователей. Если учесть значительно более ранние экспериментальные работы зарубежных авторов, то в целом это направление принадлежит к числу традиционных и по-прежнему весьма актуальных для геологии россыпей и для понимания геоморфологических процессов в целом. При этом необходимо уточнить, что экспериментирование в геологии россыпей, в частности, моделирование россыпеобразующих процессов, может быть по своему содержанию как морфогенетическим, так и литогенетическим. В первом случае опыт ставится в целях воспроизведения морфологических элементов россыпи или обстановок, в которых она формировалась. Задача же литогенетических экспериментов состоит в моделировании механизмов физической и химической деструкции минералов при выветривании, в экспериментальном исследовании седиментационного процесса, выявления физико-химических условий осаждения и т.д.

Технико-методическое направление исследовательских работ в геологии россыпей ставит своей целью совершенствование методики поисково-разведочного дела. Широко известны работы Ю.Н. Трушкова, П.Л. Калистова, А.П. Божинского и других исследователей в этом направлении. Следует заметить, что в дальнейшем роль технико-методических исследований будет возрастать в связи с необходимостью поисков россыпных месторождений новых типов и в сложных геологических условиях.

Прогнозно-металлогенетическое направление получило наибольшее развитие при изучении отдельных регионов, в частности Северо-Востока СССР. В сущности, это направление базируется на комплексном подходе к пониманию условий формирования и размещения россыпных месторождений. В этом отношении прогноз является синтезом данных о россыпной продуктивности территории, полученных всеми методами изучения россыпей того или иного района. В то же время, как показали работы Ю.А. Травина, С.Г. Желнина, П.Д. Волошина, И.Б. Флерова, П.О. Генкина, Г.Ф. Павлова, Ю.Г. Толпегина и других авторов, комплексный металлогенетический анализ имеет свои особенности и обладает самостоятельностью научного направления, о чем свидетельствуют успешные проработки проблемы прогноза россыпных месторождений для крупных регионов (работы Н.Г. Пятых-Кара, Б.И. Прокопчука).

Итак, в приведенном кратком обзоре тенденций в развитии геологии россыпей затронуты лишь некоторые направления, на которые дифференцировалась наука о россыпях более чем за столетний период ее эволюции как одной из ветвей геологии. В этом обзоре мы не касались тех исследований, в которых формирование россыпей рассматривается с физико-химических и литогенетических позиций. Дан-

ная работа имеет прежде всего литогенетическую направленность, и сущность этого подхода будет выявляться по мере изложения материала на протяжении всей книги.

В основу развиваемого подхода положен четкий литогенетический принцип, согласно которому формирование россыпей является специфичным частным случаем континентального литогенеза в целом и не может быть правильно понято в отрыве от общей эволюции обломочного материала на поверхности Земли. В этом отношении литогенетическое направление тесно сближается с геохимией зоны гипергенеза и с учением о корках выветривания. В то же время совершенно очевидно, что оно не повторяет и не дублирует сложившихся в геологии россыпей направлений, а лишь дополняет их, углубляя некоторые из имеющихся представлений.

### ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЯ

В общей теории литогенеза Н.М. Страхова проблемам собственно континентального литогенеза отведено сравнительно немного места. Суша в целом рассматривается как область питания терригенным материалом, а главной седиментационной ареной являются акватории внутренних морей и океанических бассейнов. Попытки использовать генеральную схему типов литогенеза и их эволюции в истории Земли для рассмотрения проблем россыпеобразования наталкиваются на необходимость детализации общих положений как в общетеоретическом плане, так и в применении к конкретным регионам, металлогеническим провинциям или рудным зонам. Многочисленные же локальные, зональные или регионально-морфоструктурные отклонения от генеральной схемы литогенетической типизации приводят к попыткам выделения промежуточных (провинциальных) типов литогенеза [206] или даже к отрицанию универсального значения литогенетической зональности. Недостаточность общей теории литогенеза для теоретических построений в геологии россыпных месторождений связана также с тем, что Н.М. Страхов, принимая климат и тектонику в качестве движущих сил литогенеза, в то же время совершенно исключал из рассмотрения литогенный фактор, т.е. особенности состава пород и его влияние на процессы мобилизации обломочного материала. Для понимания же процессов россыпеобразования этот фактор является одним из главных.

Оценивая все названные факторы с позиций физико-химических и литогенетических условий образования россыпей, нам пришлось убедиться в том, что основные представления в геологии россыпей о выветривании совершенно произвольно заимствованы из почвоведения и учения о корках выветривания. Но поскольку процессы выветривания при образовании россыпей имеют не слишком много общего с почвообразующими процессами, то проблему выветривания в россыпеобразовании целесообразно проанализировать, исходя из некоторых общих литогенетических представлений, уходящих корнями в область почвоведения и учения о корках выветривания.

В настоящее время признано, что многие характеристики физико-

географической среды на поверхности Земли зональны. Первооткрыватель зональности В.В. Докучаев относил это явление к категории мировых законов, определяющих процессы почвообразования на поверхности нашей планеты. Позже к проблеме связи климатических и литогенетических процессов подошли те геологи, научные интересы которых находились на стыке почвоведения и геологии. Б.Б. Польшов сделал принципиально важный вывод о том, что роль климата в выветривании горных пород должна учитываться в сопоставлении с составом самих пород. Во вступительном очерке к избранным трудам Б.Б. Польшова [119] А.И. Перельман отмечает, что до работ Б.Б. Польшова в учении о выветривании безраздельно господствовала климатическая теория типов выветривания, согласно которой различные формы элювия (латериты, сиаилитная кора и т.д.) суть неизменные типы выветривания, строго приуроченные к определенному климату. Б.Б. Польшов опроверг эти представления и показал, что развитие элювия во всех климатах имеет общую тенденцию — вынос легкоподвижных элементов. Огромную роль при этом играет фактор времени, а отдельные типы коры выветривания представляют собой лишь стадии общего процесса. Развивая идею непрерывности процесса выветривания и единства всех факторов, обуславливающих этот процесс, Б.Б. Польшов пришел к выводу, что принятое разделение выветривания на химическое, физическое и биологическое принципиально ошибочно.

Последовательно реализуя генетический принцип в исследовании почвообразования, Б.Б. Польшов пришел к необходимости выразить климатический фактор и фактор времени через некоторые физико-химические представления, например через скорость реакции, функционально связанной с временем. Рассматривая скорость реакции как скорость процесса взаимодействия между определенными реальными массами реагирующих веществ, Б.Б. Польшов полагает, что именно эта величина играет главную роль в химической кинетике, с чем необходимо считаться при изучении превращений в земной коре. Другое физико-химическое обобщение, использованное Б.Б. Польшовым для установления отношения между процессом и временем выветривания, опирается на закон превращений Оствальда. Суть его в том, что при выветривании соблюдается последовательность превращений вещества: первоначально образуется не та форма состояния вещества, которая более всего устойчива, а та, которая ближе всего к исходной форме, т.е. превращение в которую связано с наименьшей затратой энергии. Для анализа литогенетических проблем россыпеобразования наиболее важным в работах Б.Б. Польшова является его обращение к идее энергетической обусловленности процессов выветривания. Разрушение и раздробление массивных горных пород, писал исследователь, есть процесс перехода материи в более активное состояние [119]. Он полагал, что при выветривании меняется форма материи и энергии. При этом трансформации подвергается как поглощаемая горными породами космическая и в особенности солнечная энергия, так и внутренняя энергия, присущая твердому состоянию материи и как бы высвобождаемая при его раздроблении [119].

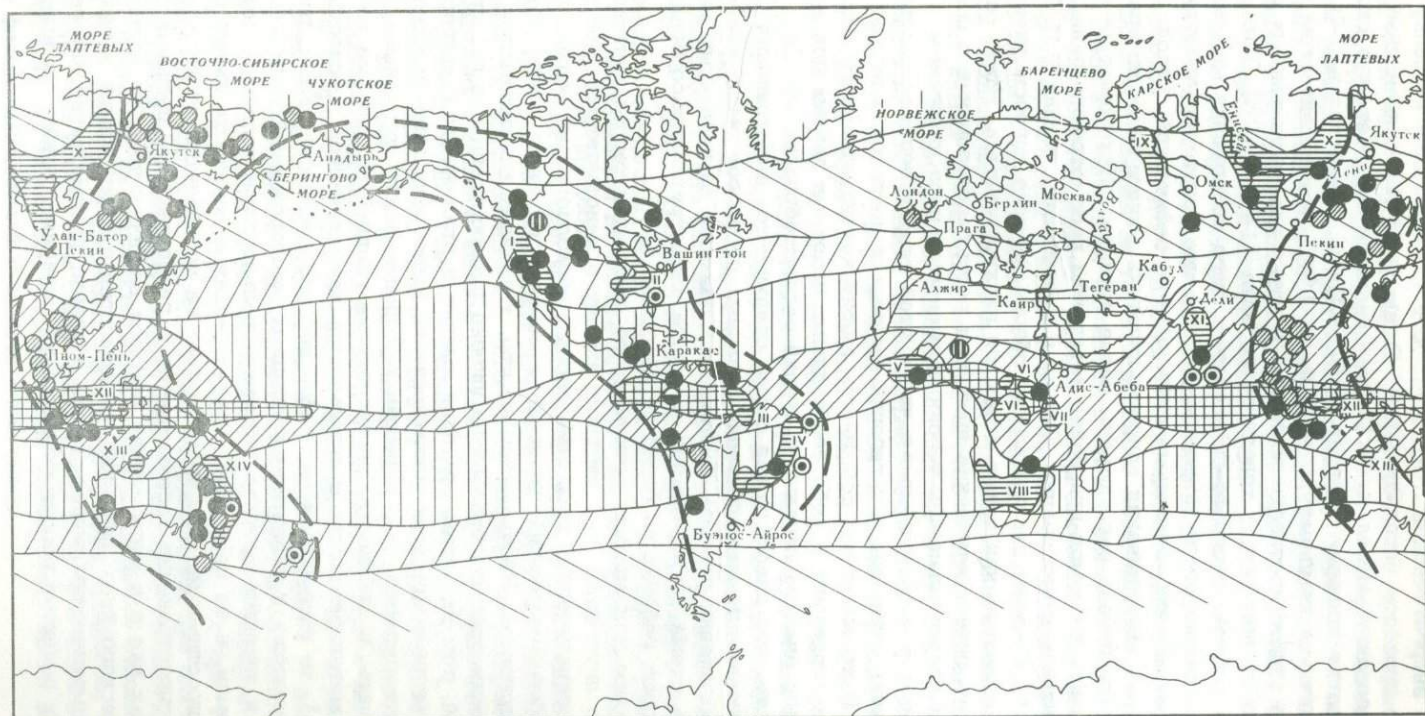
Таким образом, Б.Б. Польнов, во-первых, трактовал литогенетическую зональность как явление, обусловленное не столько климатическим фактором, сколько фактором времени. Заметим, что несколько позже к близким выводам на обширном экспериментальном и аналитическом материале подошел Г. Иенни [50]. Во-вторых Б.Б. Польнов считал процесс выветривания обусловленным взаимопереходами энергии в зоне выветривания, а скорость выветривания связывал с количеством приходящей и высвобождающейся энергии и с фактором времени.

Несмотря на то что в работах 30–40-летней давности содержались важные указания на то, что в основе всех превращений вещества на земной поверхности находится энергия, приходится констатировать, что и до настоящего времени энергетические принципы анализа литогенетических процессов не получили существенного развития. В лучшем случае литологи подчеркивают роль климата, не раскрывая механизмов взаимосвязи между превращениями минералов и теми или иными физико-химическими составляющими климата. В частности, Л.Б. Рухин широко использовал данные о древних и современных климатах для решения палеогеографических задач, однако оставлял открытым вопрос о роли компонентов климата в формировании отличительных признаков, являющихся индикаторами того или иного климата [135]. Н.М. Страхов отмечал, что механической денудации на территории гумидных климатов присуща ясно выраженная зональность [159]. Для объяснения причин этого явления он использовал правило Вант-Гоффа об ускорении химических реакций с повышением температуры. Но это не снимает вопроса, поскольку, во-первых, ссылкой на правило Вант-Гоффа можно было бы объяснить усиление химической денудации, но не механической, а во-вторых, указанное правило оказывается не всегда применимым для интерпретации литогенетических процессов.

Попытку найти связь континентального литогенеза с физико-географической средой предпринял Н.И. Кригер [68]. Он полагает, что зональность континентального литогенеза зависит от распределения радиационного баланса земной поверхности  $R$  и радиационного индекса сухости  $R/Lr$ , где  $r$  – годовая сумма осадков, а  $L$  – скрытая теплота испарения. Автор полагает, что, помимо "прямого и очевидного влияния  $R$  и  $R/Lr$  на континентальный литогенез, существует влияние косвенное, не менее важное. Оно связано с зависимостью продуктов континентального литогенеза от сингенетично протекающих процессов почвообразования и выветривания". И далее: "Интенсивность химического выветривания находится в соответствии с интенсивностью физико-географического процесса  $E$ , которая является функцией  $R$  и  $R/Lr$ " [68, с. 1374]. Отмечается, что при  $R$  менее  $50 \text{ ккал/см}^2$  развивается ледниковая седиментация, при значениях  $R$ , превышающих эту величину, характерно образование глинистых пород, и т.д. Несмотря на перспективность в принципиальном отношении подхода Н.И. Кригера к трактовке литогенетических процессов, нетрудно заметить, что его работа также лишь констатирует взаимосвязь литогенетических и физико-географических параметров, но не затрагивает физико-химической сущности этой связи.

Идею энергетической обусловленности выветривания и оценку темпа этого процесса использует В.М. Синицын [146] при анализе бокситообразования. Вслед за Н.М. Страховым он полагает, что скорость выветривания подчиняется правилу Ванг-Гоффа, возрастая в 2-3 раза при увеличении температуры на каждые 10°C, и в тропическом климате она может достигать значений, в сотни раз превышающих соответствующие показатели холодного климата [146, с. 26]. Таким образом, в работах географо-литогенетического содержания мы находим лишь самые общие принципы, содержащие некоторые представления о взаимосвязи литогенеза с физико-географической средой. В учении о корях выветривания вопросы кинетики минеральных превращений в зоне гипергенеза рассмотрены более детально. Некоторых из этих вопросов мы коснемся при более детальном рассмотрении процессов и механизмов выветривания. Однако в целом, как показал В.П. Петров [114] в своем аналитическом обзоре, многие вопросы учения о корях выветривания также остаются дискуссионными. Итак, попытки связать литогенетические проблемы россыпеобразования с современными представлениями теории континентального литогенеза сталкиваются с тем затруднением, что в этой теории вопросы россыпеобразования отнесены к категории частных и достаточно второстепенных. В то же время собственно теория континентального литогенеза не содержит в себе необходимых исходных данных для всестороннего анализа начальных стадий россыпеобразования. Достаточно сказать, что классическая схема стадийности выветривания [31] малоприспособна для интерпретации реальных процессов выветривания и высвобождения россыпеобразующих минералов из первичных руд, хотя эта схема и принимается из чисто иллюстративных соображений в некоторых работах по геологии россыпей [97].

На основании анализа современного состояния теории континентального литогенеза мы пришли к выводу о невозможности построения литогенетической концепции россыпеобразования на основе чрезмерно общих положений, на которые опирается теория континентального литогенеза. Не удивительно, что, хотя идея климатической обусловленности россыпеобразования широко распространена в геологии россыпей, тем не менее эта идея именно в приложении к вопросам формирования россыпных месторождений имеет еще меньше конкретных подтверждений, чем в теории континентального литогенеза. Если сравнить, в частности, распределение главнейших районов россыпной металлоносности с современной климатической поясностью (рис. 1), то выявляется их полная несогласованность. Узлы, районы и провинции с развитием россыпных месторождений отчетливо тяготеют к ориентированным субмеридионально планетарным рудным поясам Земли, в то время как климатическая зональность имеет широкое простирание. Это противоречие не устраняется и ссылками на иное распространение палеоклиматов в геологическом прошлом планеты, так как и в этом случае россыпи одного и того же возраста, генетического типа, строения оказываются приуроченными к различным климатическим зонам. Таким образом, рассмотрение литогенетических аспектов россыпеобразования позволяет прийти к выводу,



что геология россыпей в настоящее время опирается на весьма общие литогенетические концепции, не содержащие детальных характеристик особенностей поведения россыпеобразующих минералов в зависимости от обстановок осадконакопления. Это порождает противоречивость теоретических представлений по таким принципиально важным проблемам, как выветривание коренных источников, транспортировка ценных минералов в осадкоформирующих средах, концентрация минералов и т.д. Отмеченное обстоятельство побуждает детальнее разобрать эти проблемы.

### Проблема выветривания в геологии россыпей

В свое время Ю.А. Билибин [9] показал, что теория россыпеобразования должна начинаться с характеристики коренных источников и тех их особенностей (типов, формы, размера, вещественного состава), которые приобретают важное значения для процессов выветривания коренных источников в начальные стадии россыпеобразования. Обращено внимание на различия в устойчивости минералов в зависимости от содержания кремнезема в их составе, отмечены накопление кварца в корах выветривания, связь повышенной устойчивости горных пород с повышенным содержанием кварца и т.д. Однако эти данные приведены Ю.А. Билибиным в его книге [9] в виде сведений общего характера, а в развиваемой им теории россыпе-

Рис. 1. Принципиальная схема размещения районов проявления россыпных месторождений и климатической зональности земного шара (составлена автором по материалам А.К. Болдырева, С.И. Гурвича, Е.А. Радкевич, И.С. Рожкова, В.И. Смирнова, В.С. Трофимова, Н.А. Шило, а также "Физ.-геогр. атласа Мира" под ред. И.П. Герасимова [173])

Наиболее известные районы проявления россыпей: I - золота; 2 - платины; 3 - оловянные; 4 - титано-циркониевые; 5 - редкометалльные; 6 - алмазонасные площади: I - Тихоокеанского побережья Северной Америки, II - Аппалачская, III - Гвианская, IV - Бразильская, V - Западно-Африканская, VI - Центрально-Африканская, VII - Восточно-Африканская, VIII - Южно-Африканская, IX - Уральская, X - Сибирская, XI - Индийская, XII - Калимантанская, XIII - Западно-Австралийская, XIV - Восточно-Австралийская. Штриховыми линиями показаны планетарные рудные пояса, к которым тяготеют проявления россыпей. Климаты: 7 - жаркий и влажный экваториального пояса; 8 - теплый значительного увлажнения субэкваториального пояса; 9 - пассатные сравнительно дождливые тропические области; 10 - жаркий засушливый с очень большой суточной амплитудой температур; 11 - области преобладания муссонного климата субтропического пояса; 12 - области больших сезонных колебаний температур воздуха с достаточным увлажнением умеренного пояса; 13 - области наибольших на земном шаре колебаний температур субарктического пояса

образования начальные стадии формирования россыпей не увязаны с развитием речных долин и с эродированием коренных источников разных типов. Этот пробел в теории россыпеобразования приводил и самого исследователя к некоторым противоречивым выводам. В частности, в начале своей книги "Основы геологии россыпей" Ю.А. Билибин подчеркивал, что факторы физической неоднородности руд и горных пород всегда первичны по отношению к физическому и химическому выветриванию, поскольку во многих породах имеются первичные трещины, а также трещины более позднего происхождения, но не связанные с физическим выветриванием. Однако, оставляя в стороне эту важную особенность физической структуры рудного вещества — предрасположенность прежде всего к физической деструкции, автор констатировал, что руды и горные породы подвергаются на земной поверхности совокупному воздействию физического и химического выветривания [9, 45—51]. Следуя этому представлению, исследователь признавал множественность источников и способов поступления золота к руслу, но не отдает предпочтения какому-либо из них, предположим размыв и мобилизации материала кор выветривания. Основным источником поступления золота к руслу Ю.А. Билибин считал размыв металлоносного коллювия вообще, выделяя такие варианты, когда "коллювий богат крупным каменистым материалом (крутой склон, хрупкие породы)" или когда "коллювий очень богат песчано-илистыми частицами" [9, с. 171]. Он вполне допускал пополнение аллювия металлом и за счет коренного дна долины, если плотик аллювиальной россыпи сложен глинистыми сланцами, в которых проходит сеть золотоносных кварцевых прожилков. Последние, выветриваясь и разрыхляясь под слоем аллювия, дают начало элювиальной россыпи. Помимо собственного элювиального золота, такая россыпь может также содержать известное количество и аллювиального золота, опустившегося из вышележавшего аллювия [9, с. 179]. При этом выветривание плотика россыпи Ю.А. Билибин представлял прежде всего как процесс физико-механического разрушения. Он совершенно определенно утверждал, что аллювиальные россыпи не требуют для своего образования каких-то особых условий в отношении режима водных потоков. И "лучшим доказательством этого является то, что во многих золотоносных районах образование их происходит и в настоящее время и может непосредственно нами наблюдаться" [9, с. 179].

Однако наряду с этим выводом мы встречаем в книге утверждение о том, что "случай, когда аллювиальная россыпь образуется в речной долине впервые, является довольно исключительным, и поэтому, рассматривая процесс образования аллювиальных россыпей, мы должны рассматривать по существу процесс ее преобразования" [9, с. 151]. Вместе с признанием возможности образования россыпей за счет самых разнообразных источников Ю.А. Билибин приходит к неожиданному заключению: "Наибольшая порция металла может быть подготовлена в процессе пенеппенизации местности, который требует очень длительного периода выветривания и разрушения громадных масс коренных пород. В аллювиальную россыпь этот

металлы поступает лишь после того, как пенеплен будет поднят на некоторую высоту и расчленен новыми долинами" [9, с. 172]. Таким образом, признавая, с одной стороны, россышеобразование как следствие совокупного проявления физического и химического выветривания и как результат совершенно обычной деятельности потока, а также не отрицая, что образование россыпей происходит и в настоящее время, Ю.А. Билибин вместе с тем акцентировал внимание геологов на тезисе о необходимости эпох выветривания и планиции рельефа для максимального проявления россышеобразования. В результате к середине 50-х годов в геологии россыпей прочно укоренилось мнение о том, что продуктивный цикл россышеобразования включает фазу тектонического покоя с синхронно развивающейся пенепленизацией территории и формированием мощных кор химического выветривания; затем следует фаза тектонической активизации, расчленение пенеплена речной сетью, промыв металлоносного материала и образование россыпных месторождений. Надо заметить, что подобная точка зрения искусственно сдерживала расширение поисково-разведочных работ, поскольку для выбора перспективных районов одним из главных условий являлось наличие реликтов кор выветривания, эпох планиции рельефа в геологической истории золотоносных районов и т.п. В соответствии с такими представлениями из числа перспективных исключались районы молодого эрозионного расчленения, с проявлениями ледниковой аккумуляции и т.п.

На фоне широкого распространения среди геологов идеи о формировании россыпей за счет кор химического выветривания новаторской и смелой научной концепцией явилась система взглядов Н.А. Шило на образование россыпей, впервые в наиболее цельном виде изложенная им в 1956 г. [196]. Сущность этой концепции заключается, как известно, в том, что огромное значение на всех стадиях россышеобразовательного процесса имеют физико-механические факторы в виде морозной деструкции, дробления рудного материала в русле и т.д. В дальнейшем взгляды Н.А. Шило получили подтверждение в многочисленных полевых наблюдениях, а также нашли достаточно корректное математическое обоснование [118]. Вместе с тем следует признать, что в результате работ Н.А. Шило проблема выветривания в геологии россыпей не была решена полностью. Выявилась лишь новая грань проблемы, ранее совершенно игнорировавшаяся, а вопрос об истинном соотношении физического и химического выветривания по-прежнему остается открытым. А.А. Кухаренко [71] полагает, что в едином процессе изменения горных пород в условиях земной поверхности существуют две его формы: физическое выветривание, выражающееся в дезинтеграции пород, и химическое выветривание, приводящее к более или менее глубокому изменению их химического и вещественного состава. Причем оба эти процесса взаимосвязаны, протекают одновременно, но управляются различными факторами, интенсивность проявления которых различна на разных этапах выветривания. С известным приближением к действительности А.А. Кухаренко обе эти формы выветривания рассматривает как две последовательные стадии единого процесса разрушения горных пород: физиче-

ское выветривание, измельчая породу, как бы подготавливает материал для более глубокого химического изменения самого вещества породы.

В.С. Трофимов не отрицает, что в поясе с умеренным и холодным климатом аллювиальные россыпи образуются как за счет размыва маломощных кор выветривания, так и за счет размыва твердых коренных пород. Вместе с тем он подчеркивает, ссылаясь на Е.З. Горбунова, что существование богатых и крупных россыпей золота в северных районах с холодным климатом является результатом размыва современной речной сетью древней коры выветривания [167] (с. 108). Таким образом, В.С. Трофимов полагает, что хотя физическое выветривание разрешает в литогенетическом смысле формирование россыпей, но это скорее исключение из правила, а главные россыпеобразующие эпохи все же следует связывать с тропической гумидной зоной, так как наиболее благоприятные условия для образования россыпей различного генезиса существуют, по его мнению, там, где широко развиты коры химического выветривания. Но, поскольку такой вывод противоречит отмеченному нами выше факту распространения россыпей в различных климатических зонах (см. рис. 1), В.С. Трофимов высказывает предположение, что тропические гумидные зоны в различные геологические периоды располагались в различных частях земного шара [167, с. 111].

Даже не вдаваясь в детальный разбор подобных представлений, легко заметить, что они существенно не согласуются с геологическими данными. При анализе фактического материала по различным провинциям россыпной золотоносности, оловоносности и алмазносности выявляется, что россыпи, расположенные в совершенно различных климатических зонах, имеют одинаковый или близкий геологический возраст. Понятно, что для их образования вовсе не требовалось перемещения тропических гумидных зон в различные части земного шара. Не подтверждается тезис о перемещениях климатических зон, коррелятивно с которыми могли бы мигрировать по поверхности Земли и фазы максимальной продуктивности россыпеобразования, и в свете данных В.М. Синицына [146] о существенной стабильности климатической зональности на нашей планете.

Касаясь исследований В.С. Трофимовым проблем россыпеобразования, нельзя не отметить высказанную им принципиально верную идею о том, что в различных климатических зонах соотношение элювиальных, аллювиальных и других генетических типов россыпей должно меняться в зависимости от удельной роли физических и химических факторов выветривания. К исходному выводу пришел и Н.А. Шило [200] с позиций тектоно-геоморфологического анализа эволюции поверхности Северо-Восточной россыпеносной провинции. Выводы В.С. Трофимова значительно детализированы и углублены работами Н.В. Разумихина, предпринявшего попытку связать россыпеобразовательный процесс с географическими условиями его проявления. По мнению этого исследователя [126-129], единый по своей сущности процесс россыпеобразования проявляется по-разному в различной природной обстановке, что позволяет выделить зональные и а зональные факторы россыпеобразования и целый ряд отличительных признаков

россыпных месторождений, образовавшихся в различных климатических условиях. Вместе с тем Н.В. Разумихин подчеркивает, что "до сих пор нет полной ясности о роли зональных и азональных факторов в образовании россыпей" [126, с. 442].

Крайне противоречивы и взгляды многих других исследователей. Е.Я. Синюгина, Г.П. Воларович, С.В. Яблокова [147] считают, например, что продуктивной фазе цикла россыпеобразования предшествует формирование выровненной поверхности с площадной корой выветривания, развитием зон окисления и элювиальных россыпей, при размыве которых в продуктивную фазу цикла и происходит концентрация золота в промышленные залежи. Однако такая точка зрения находится в явном противоречии с содержащимся в этой же работе утверждением о том, что золото, заключенное в россыпях современных долин, перешло из коренных источников, расположенных ниже поверхности эрозионного среза, достигнутого к началу активизации движений и углубления долин. Иными словами, мобилизация золота в россыпи современных долин связывается с взрезом рек в коренные источники после начала неотектонической активизации. Сошлемся, наконец, на высказывания еще трех исследователей, наглядно отражающие поразительный разноречивый мнений в вопросе о роли выветривания при формировании россыпей. Л.Б. Рухин утверждал, например, что "россыпные месторождения, в отличие от других скоплений полезных ископаемых образуются в результате физического, а не химического выветривания" [135, с. 458]. Г.В. Нестеренко, напротив, полагал, что "в целом очевидна доминирующая роль в осадко- и россыпеобразовании процессов химического выветривания" [97, с. 62]. С.Г. Желнин считает, что "наиболее интенсивно процессы россыпеобразования должны происходить в условиях критических эпох эволюции климата, которым соответствует как резко континентальная, так и жаркая и влажная климатическая обстановка [47, с. 240]. Заметим, что такая "компромиссная" точка зрения сама по себе является показательной как свидетельство невозможности на основании общих геологических рассуждений дать критический анализ истинного соотношения физических и химических факторов в процессах выветривания, тем более, что в качестве "доказательства" роли химических процессов в россыпеобразовании С.Г. Желнин, так же как и большинство авторов работ по геологии россыпей, принимает данные Б.Б. Польнова, И.И. Гинзбурга, К.К. Никитина и других исследователей, рассматривающих вопросы выветривания применительно лишь к задачам почвоведения и учения о корях выветривания.

Итак, приведенные выше высказывания различных авторов по проблеме выветривания в геологии россыпей вполне иллюстрируют отсутствие единой точки зрения на эту проблему, а также недостаточную глубину аргументации в пользу и той и другой концепции. Этот факт является для нас дополнительным подтверждением актуальности выbranного направления исследований и острой потребности геологии россыпей в экспериментальных и физико-химических данных по проблеме выветривания, которые давали бы надежду на выход теории россыпеобразования из тупика тривиальных истин и бесплодных дискуссий.

## Проблема миграции и концентрации россыпеобразующих минералов

Если проблема выветривания в геологии россыпей возникла из представлений почвоведения и учения о корях выветривания, то проблема миграции и концентрации россыпеобразующих минералов имеет в значительной степени геохимическое содержание. Вместе с тем следует иметь в виду, что в геохимии прежде всего анализируется проблема миграции вещества в элементной форме, в то время как вся геология россыпей основывается на данных о минеральных формах рассеяния и концентрации. С геохимической точки зрения, согласно А.Е. Ферсману, факторами миграции являются: 1) свойства связи, 2) химические свойства соединений, 3) энергетические свойства ионов, 4) гравитационные и 5) радиоактивные свойства атомов. Под свойствами связи в геохимии понимают способность элемента или его соединения противостоять силам, стремящимся разбить его атомы (ионы, молекулы). Эти свойства (твердость, химическая инертность) проявляются при механическом воздействии (истирание, измельчение) или химическом (растворение, окисление). Они тесно связаны с энергией кристаллической решетки, и известно, что наибольшей механической прочностью обладают соединения с высокой энергией решетки [140].

Химические свойства элементов и их соединений определяют миграционную способность минералов и сам спектр минеральных видов. Из общего числа известных в настоящее время химических элементов теоретически мыслимо астрономическое число соединений. В действительности количество минералов ограничивается неустойчивостью большинства соединений. Считается [140], что из различных соединений устойчивее такие, которые являются наиболее экзотермическими, т.е. соединения с максимальным тепловым эффектом, например, различные кислородные соединения, теплота образования которых выше, чем сульфидов.

Свойства кристаллической решетки также играют важную роль в миграции минералов. На эндогенной стадии элементы из подвижного состояния в расплаве или в растворе переходят в твердое состояние. Переход в кристаллическую форму, характеризующуюся значительно меньшей подвижностью атомов (ионов), сопровождается потерей их части свободной энергии. Избыток ее, равный энергии кристаллической решетки, выделяется в момент кристаллизации. В свою очередь, энергия кристаллической решетки определяет поведение минерала в процессах выветривания на земной поверхности. Гравитационные свойства атомов элементов определяет масса атома вследствие существования всемирного тяготения, действующего на атом с силой, пропорциональной массе и обратно пропорциональной квадрату расстояния. Влияние этого фактора миграции проявляется в процессах денудации, отложения в водной среде и т.д. Таковы, если не считать радиоактивных свойств элементов, некоторые факторы миграции, принимаемые во внимание геохимией и имеющие отношение к постановке этой проблемы в геологии россыпей. В целом миграционные процессы в минеральной форме выделены А.Е. Ферсманом в виде понятия о

механогенезе, т.е. об образовании минеральных скоплений в результате механического обогащения в природных условиях. Попытку выявить геохимическое единство элементной и минеральной форм миграции предпринял В.В. Поликарпочкин [118], создав стройную теорию образования россыпных концентраций как разновидности потоков рассеяния. Однако эта схема по сути своей является геохимической и не решает проблемы концентрации россыпеобразующих минералов в том традиционном содержании, как она сложилась в геологии россыпей. Таким образом, подобно тому как не удается найти удовлетворительное решение проблемы выветривания в геологии россыпей с позиций общих литогенетических представлений, также невозможно найти удовлетворительную в практическом отношении трактовку проблемы миграции и концентрации россыпеобразующих минералов с позиций геохимии. Данное обстоятельство лишь иллюстрирует тот факт, что и в этом вопросе геология россыпей должна искать самостоятельное решение своих специфичных теоретических и практических задач.

В геологии россыпей проблема миграции и концентрации россыпеобразующих минералов трансформировалась в более узкий вопрос о транспортировке минералов в русловых потоках. Однако и эта, казалось бы частная, задача в настоящее время выглядит весьма запутанной и противоречивой, являясь вместе с тем одной из наиболее важных. Специальное совещание, созванное Академией наук и Министерством геологии СССР (Якутск, 1975 г.), констатировало, что транспортировка полезных ископаемых в водном потоке является узловой проблемой как в отношении образования россыпей, так и для разработки методики поисков коренных месторождений. Наиболее известная научная трактовка поведения россыпеобразующих минералов в водном потоке предложена в конце 30-х годов Ю.А. Билибиньм. Он считал, что перемещение ценных минералов, например золота, происходит в речном русле, когда в движении при полном половеде вовлекается и самый нижний металлоносный слой, лежащий непосредственно на коренном дне [9]. Представления Ю.А. Билибина получили широкое распространение и разделялись практически всеми геологами-россыпниками до середины 50-х годов, когда Н.А. Шило [196], а затем и другие геологи привели доказательства очень малой перемещаемости золота и россыпеобразующих минералов. В настоящее время принято считать, что в зависимости от конкретных условий россыпеобразования дальность перемещения минералов следует связывать с эволюцией аллювиальных россыпей во времени и пространстве [60, 170, 238], с гидродинамикой водного потока [25, 225], а также с крупностью минеральных частиц, с проявлениями неотектонических движений, с типом россыпеобразующей формации, с особенностями водно-аллювиальной среды и с некоторыми другими факторами.

В целом острота вопроса о транспортировке в условиях водного потока наиболее ярко видна на примере золота. Вся история формирования возревших на условия накопления золота при образовании россыпных месторождений пронизана соперничеством двух точек зре-

ния. Одна из них признает значительную подвижность золота [9, 224, 232 и др.], другая предполагает его малую миграционную способность [10, 42, 226, 196 и др.]. В последние годы наметилась также тенденция к устранению противоречивости существующих представлений на основе понятий об активных и пассивных фракциях золота [179], автохтонных и аллохтонных россыпях [57], россыпях ближнего и дальнего сноса [180]. При этом устанавливаемая по геологическим данным дальность перемещения россыпеобразующих минералов от предполагаемого коренного источника определяется для золота от 1–3 до 25, 84 и даже до 300 км. Для платины эти показатели достигают 180 км, для касситерита – от 0,8 до 2,4 км для киновари – до 1–2 км. Алмазы перемещаются "до первых километров от источника" [155, с. 130] или от 15–25 км [168] до нескольких сотен километров [44, 71]. Таким образом, для каждого из россыпеобразующих минералов выявлены весьма неодинаковые значения дальности транспортировки минералов. Несомненно, что эти данные опираются на реальные геологические факты, а их противоречивость отражает конвергентность литогенетических условий, приводящих в одних случаях к значительной подвижности россыпеобразующих минералов, а в других – к резко выраженной консервативности их поведения. Вместе с тем иллюстрированная приведенными данными противоречивость существующих представлений свидетельствует также и об отсутствии единых критериев, и о неизученности конкретных параметров поведения минералов в русле водотоков. Выявление таких критериев и является одной из задач проводимых нами исследований.

## ГЛАВА II

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ РУД

Выветривание рудного вещества протекает специфично, значительно отличаясь от выветривания более однородных по составу магматических или осадочных пород. Во многих случаях выветривание коренных источников россыпей может идти по схеме формирования зоны окисления рудных месторождений. Такие варианты выветривания рассматриваются обычно с позиций геологии рудных месторождений или геохимии [152, 195, 222], однако при этом россыпеобразующая функция зоны окисления во внимание не принимается. Кроме того, зоны окисления наиболее характерны для существенно сульфидных месторождений. Во многих других случаях коренные источники могут быть представлены телами, в составе которых окисляющиеся в зоне гипергенеза минералы содержатся в минимальном количестве. Следовательно, одним из главнейших условий россыпеобразования, которое необходимо рассмотреть в первую очередь, является тип россыпеобразующей рудной формации, дающей начало образованию россыпных месторождений.

Проблема взаимосвязи коренных источников с россыпными месторождениями относится к числу наименее изученных в геологии россыпей. Главная причина этого заключается в том, что между эндогенной формой концентрации рудного вещества и экзогенной (россыпью) имеется зияющий разрыв во времени и пространстве. Объектом своего исследования в большинстве случаев мы имеем либо рудное, либо россыпное месторождение, процесс же перехода первого во второе нам недоступен ни для прямого, ни для косвенного изучения, и мы вынуждены реконструировать этот процесс с помощью умозрительных построений. Другая трудность состоит в том, что систематика рудных месторождений сама по себе сложная и еще далеко не решенная проблема.

В классификации месторождений полезных ископаемых сложились четыре основных направления группировки месторождений: морфологическое, вещественное, генетическое и геотектоническое [162]. Естественно, что геолога-россыпника должны привлекать прежде всего те из классификаций, в которых учитывается состав рудных образований. Именно вещество руды — тот материал, с которым взаимодействуют агенты гипергенеза, причем интенсивность этого взаимодействия будет определяться прежде всего химическим составом рудного вещества. С этой точки зрения наиболее подходит для целей нашего исследования концепция о россыпеобразующих рудных формациях. Принимая ее во внимание, нами были намечены типы источников, имеющие наиболее важное промышленное значение для золота, платины, олова и алмазов. Характеристика соответствующих формаций дана ниже с использованием собственных материалов автора, полученных при полевом изучении или посещениях наиболее типичных коренных и россыпных месторождений, на основании просмотра прозрачных и полированных шлифов, а также по опубликованным материалам других исследователей.

#### Россыпеобразующие формации золота

Среди эндогенных месторождений золота наибольшее россыпеобразующее значение имеют гидротермальные месторождения, первоначально относившиеся В.И. Смирновым к классу эндотермальных, а позднее — к классу плутоногенных гидротермальных месторождений. Обычно такие месторождения связаны с кислыми, реже с частично раскисленными гипабиссальными изверженными породами отчасти ранней и средней, но в основном поздней стадии геосинклинального развития или активизации платформ [151]. Н.А. Шило также придает весьма важное значение плутоногенно-гидротермальным месторождениям золота, в особенности золото-кварцевой формации, занимающей по распространенности и промышленной важности первое место [202].

Пример распространения золото-кварцевой формации — Северо-Восток СССР. Абсолютное большинство золоторудных месторожде-

Таблица 1

Химический состав руд некоторых месторождений золото-кварцевой формации (по Л.В. Фирсову, Н.А. Шило и др.)

Компонент	Месторождения					
	I - кварц белый мелко- зерни- стый	I - кварце- вые про- жилки с золотом	II - белый кристалли- ческий кварц высокотем- пературный	III - жиль- ный руд- ный кварц серый	IV - руд- ный кварц средне- зернистый	IV - крупно- зернистый жильный кварц
SiO <sub>2</sub>	99,78	97,48	99,49	96,01	98,61	98,95
TiO <sub>2</sub>	Н.о.*	Сл.	Н.о.	0,26	Н.о.	Н.о.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	0,39	0,39	0,91	0,08	0,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	1,62	0,07	0,43	0,22	0,21
FeO	"	Н.о.	Н.о.	1,12	Н.о.	Н.о.
MnO	"	Сл.	"	Н.о.	"	"
CaO	0,14	0,11	0,01	0,11	0,03	0,04
MgO	0,08	Сл.	0,10	0,08	0,03	0,02
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,09	0,32	0,08	0,03
K <sub>2</sub> O	0,00	Н.о.	0,02	0,42	0,15	0,14
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	Н.о.	"	0,04	Н.о.	0,08	0,11
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	"	"	0,04	0,10	Н.о.	Н.о.
CO <sub>2</sub>	"	"	Н.о.	0,20	0,02	0,13
Cl	"	Сл.	Сл.	Н.о.	0,01	Сл.
Сумма	100,0	99,60	100,25	99,96	99,31	99,78

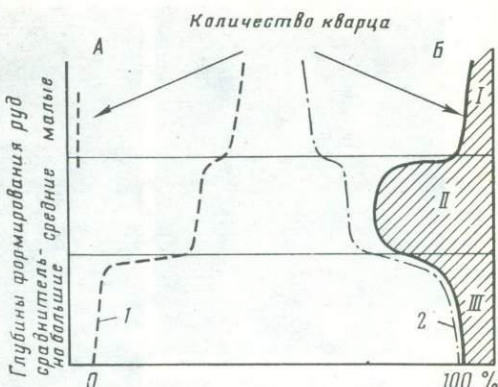
\* Анализы выполнены ВНИИ-1 (Магадан).

2\* Н.о. - не определено.

ний, являющихся коренными источниками россыпей, относится здесь по минеральному составу к золото-кварцевой формации, отличаясь небольшим или умеренным развитием сульфидов [176]. Основная масса руд интересна в промышленном отношении месторождений сложена различными типами кварца (табл. 1). Об этом же свидетельствует и валовой минеральный состав руд (в %): кварц (96), альбит (0,3), серицит (0,05), хлориты (0,05), карбонаты (1,5), арсенопирит (0,4), пирит (1,8), халькопирит (0,05), галенит (0,1) и сфалерит (0,02). Характерно, что при весьма незначительном объеме содержания сульфидов их главная масса приурочена к альбандам рудных тел и вмещающим породам. Отмеченные особенности в значительной мере свойственны жильным золоторудным месторождениям Чукотки [40, 41] и считаются вообще типичными для подобного рода месторождений [193, 220]. Таким образом, широкая распространенность и весьма значительная россыпеобразующая продуктивность золото-кварцевой формации не могут вызывать сомнений. Вместе с тем хорошо известно, что в разных месторождениях, представителях золото-кварцевой формации, а иногда и в одном и том же месторождении вещественный состав руд заметно варьирует. На это обращал внимание геологов Ю.А. Билибин, отмечая, что рудные жилы по своему отношению к выветриванию представляют боль-

Рис. 2. Соотношение сульфидных минералов и кварца в рудах различных формаций золота (по Н.В. Петровской, с изменениями)

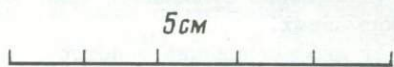
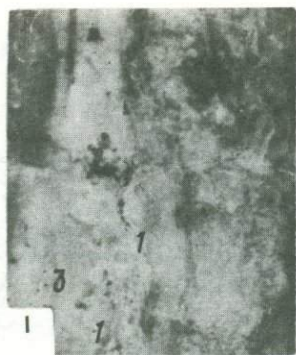
I - убого сульфидные руды; II - умеренно сульфидные руды; III - мало-сульфидные руды



шое разнообразие в зависимости от своего сложения и минералогического состава. Чем богаче рудная жила сульфидами, карбонатами и другими неустойчивыми минералами, тем легче она выветривается [9, с. 57]. Установлено, что в зависимости от состава руд месторождений золото-кварцевой формации испытывает определенные колебания и россыпеобразующая продуктивность коренных источников [13]. Следовательно, возникает необходимость дифференцировать рудные источники золото-кварцевой формации по таким признакам их минерального состава, которые имели бы россыпеобразующее значение.

Согласно В.И. Смирнову, в плутоногенных гидротермальных месторождениях могут быть выделены кварцевый, карбонатный и сульфидный подклассы. Наибольший интерес для целей нашего исследования представляют кварцевый и сульфидный подклассы. Именно эти два ряда месторождений, один из которых отличается резким преобладанием кварцевого парагенезиса, а другой характеризуется повышенным значением гипогенной сульфидной минерализации, имеют принципиальное значение для генетической интерпретации роли коренных источников того и другого ряда в россыпеобразовании. С данной точки зрения привлекает внимание, в частности, классификация Н.В. Петровской [112], систематизировавшей месторождения золота (рис. 2) по степени их сульфидности и количеству кварца. Важными признаками оруденения в этой классификации служат количественная роль разновременных минеральных ассоциаций средних и поздних, а также ранней стадии (соответственно кривые 1 и 2 на рис. 2) и различия в количестве кварца в существенно сульфидной (рис. 2,А) и убого-сульфидной (рис. 2,Б) формациях.

Н.А. Шило также не отрицает дифференциации золоторудных месторождений по степени их сульфидности, полагая, что при изучении руд такое разделение играет важную роль, так как позволяет выявлять их технологические и прочие особенности [202]. Перефразируя это замечание Н.А. Шило, можно подчеркнуть, что именно сульфиды также должны иметь огромное значение в развитии того грандиозного технологического процесса, который происходит в природных условиях при выветривании руд того или иного состава. Одна-



ко, несмотря на исключительно важное значение для процессов россыпеобразования степени сульфидности руд золота, вопрос этот в геологии россыпей не нашел должного отражения, хотя с иных позиций поведение сульфидов рассматривалось довольно детально (работы Г.Б. Свешникова и др.).

Текстурно-структурные особенности руд золото-кварцевой малосульфидной формации изучены нами совместно с Н.М. Давиденко на примере ряда месторождений. По характеру жильного кварца, типам выделений золота (рис. 3) нетрудно прийти к заключению, что такие руды должны отличаться повышенной устойчивостью к процессам выветривания. Ведущую роль в малосульфидных рудах играют трещинные выделения золота, однако типичны также брекчиевые текстуры, прожилковые, пластинчато-прожилковые (см. рис. 3). Трещинные выделения золота в кварце, причем в виде достаточно крупных прожилков, вообще характерны для данного типа месторождений (рис. 4, V). Н.В. Петровская отмечает, что в кварцевых малосульфидных рудах видимое золото часто тяготеет к контактам кварца с реликтами вмещающих пород (рис. 4, III). В обычных малосульфидных золото-кварцевых рудах сростания золота с сульфидными минералами достаточно редки. При увеличении доли сульфидов такие сростания становятся обычными (рис. 4, IV, б), нередко ассоциации со слюдистыми минералами. При повышении сульфидности руд снижается крупность выделений золота, оно становится равномерно рассеянным в рудной массе, хотя в целом локализация в зонах трещиноватости и раздробленности всегда является предпочтительной (рис. 4, I, II, IV).

Характерные черты кварца жильных месторождений — раздробленность, дислоцированность минеральных зерен, переориентированность и т.д. Это наблюдается как в минералах, входящих в состав рудных тел (рис. 4, VI), но не являющихся вмещающими для золота, так и в жильном продуктивном кварце (рис. 5). Причем чаще всего зерна золота крупнее там, где более интенсивно раздроблены вмещающие золото минеральные агрегаты. Очевидно, деформированность кристаллов является синрудной и сопровождает процесс рудо-

---

Рис. 3. Типичные формы выделений и сростаний золота с кварцем в рудах золото-кварцевой малосульфидной формации (по материалам Н.М. Давиденко и автора)

I — рудный штуф брекчиевой текстуры (1 — шеелит, 2 — обломки крупнозернистого молочно-белого кварца с золотом, 3 — золото); II и III — прожилково-пластинчатое золото (3) в кварце различных генераций (1, 2); IV — грубопрожилковая текстура (1 — крупнозернистый ранний кварц, 2 — мелкозернистый кварц продуктивной ассоциации, 3 — скопления самородного золота); V — прожилковая текстура (1 — крупнозернистый молочно-белый кварц, 2 — мелкозернистый продуктивный кварц, 3 — золото); VI — тонкопрожилковая текстура (1 — крупнозернистый молочно-белый ранний кварц, 2 — прожилки мелкозернистого голубовато-серого кварца продуктивной ассоциации, 3 — золото)



I

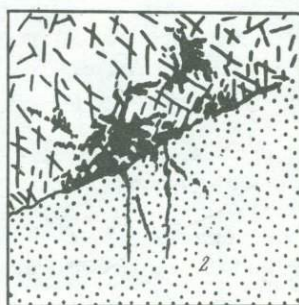
0,1 мм



II

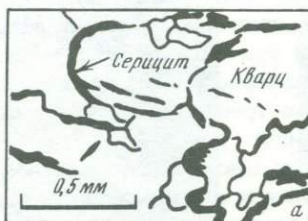
0,1 мм

0,1 мм



III

1 см



a



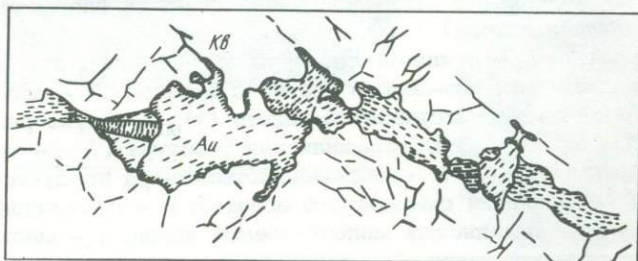
б



в



г



V

1 мм

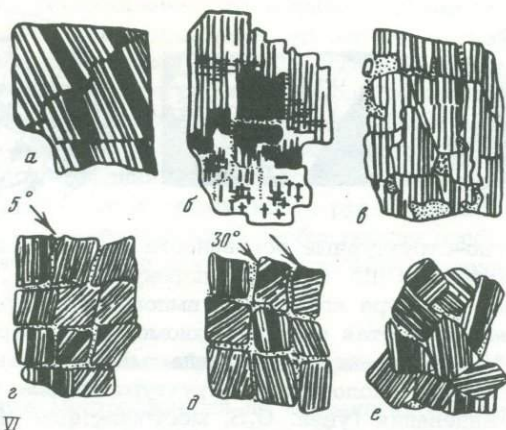


Рис. 4. Зарисовки микрострастаний золота с вмещающими минералами (матрицей) и характер дислокаций минеральных зерен в рудах (по А.И. Фасталовичу, Н.В. Петровской, Л.В. Фирсову, Г.Г. Дук)

*I* — золото (Au) выполняет промежутки между зернами кварца (Q); *II* — плохо образованные округлые и удлиненные кристаллы кварца по границам мозаичных блоков кварца (*a*) и в трещиноватом кварце (*б*); *III* — тонкие прожилки золота (черное) на контакте кварцевой жилы (*1*) с роговиком (*2*); *IV* — соотношения серицита, мусковита и золота с кварцем и сульфидами (*a* — пострудный серицит между зернами кварца и в трещинах, *б* — срастание галенита и золота, *в, г* — замещение мусковита золотом); *V* — прожилков золота в кварце; *VI* — характерные проявления дислоцированности минералов, в частности плагиоклазов, в рудах (*a, б, в* — сбросообразования в зернах, *г, д* — их переориентация, *е* — перекристаллизация)

отложения, в то же время предопределяя особенности поведения рудного вещества в процессах выветривания.

Приведенные сведения о некоторых особенностях золото-кварцевых руд, разнообразие их текстурно-структурных свойств, наличие или отсутствие сульфидов создают представление о неизбежной дифференцированности поведения разных типов рудного вещества в процессах выветривания. При этом ведущее значение приобретает степень сульфидности руд. Известно, что хорошо развитые зоны окисления формируются на существенно-сульфидных и умеренно-сульфидных месторождениях. В малосульфидных рудах встречаются лишь отдельные гнезда и прожилки гипергенных минералов с ореолами обоживания жильного кварца [112].

Н.А. Росляков [133] рассмотрел поведение золота в зоне гипергенеза на примере месторождений жильного, штокверкового, прожилково-вкрашенного и метасоматически-сульфидного типов. Для месторождений золото-кварцевой умеренно-сульфидной формации им отмечено развитие зоны окисления, причем наиболее интенсивно процессы окисления проявились в выходах метасоматических руд, а так-



Рис. 5. Текстурно-структурные особенности жильного кварца из некоторых месторождений США (по В.Линдгрёну)

*А* – нормальная текстура кварцевого выполнения: черное – арсениспирит, остальная зернистая масса – идиоморфный кварц с включениями (увел. 42, золото-кварцевая жила, месторождение Грос-Вэли, Калифорния); *Б* – полосчатая структура кварца вследствие частичного расщепления (увел. 0,5, месторождение Невада-Сити, Калифорния); *В* – жильный кварц с признаками раздавливания и развития полосчатой структуры (увел. 7, месторождение Невада-Сити, Калифорния)

же в жилах, первичный состав которых представлен пиритом и примесью сульфидных минералов. Очень слабо оказались окислены участки жил, бедные сульфидами. Другие исследователи месторождений Сибири также пришли к выводу, что в условиях химического выветривания минерализованные породы и сульфиды очень неустойчивы и не сохраняются в корках выветривания, зонах окисления и продуктах их переотложения. И напротив, жильный кварц, как наиболее устойчивый компонент, полностью сохраняется в корках выветривания, а при их переотложении даже накапливается [96].

Л.А. Николаева, детально рассмотревшая некоторые типы коренных месторождений золота именно в отношении их роли в россыпеобразовании, отмечает, что золото из кварцевых жил отличается от золота из зон сульфидной минерализации более крупными размерами выделений, более крупной зернистостью и другими признаками [101]. Причем она также считает, что процессы гипергенного изменения золота в малосульфидных рудах выражены слабо; напротив, в зоне окисления умеренно сульфидных руд количество вторичного золота возрастает [101]. Таким образом, данные целого ряда исследователей, хорошо согласующиеся с нашими наблюдениями, свидетельствуют о том, что степень сульфидности руд наряду с учетом других свойств вполне может быть принята за основу для выявления физико-химических особенностей поведения рудного вещества в процессах выветривания. В силу имевшихся у нас возможностей исследованы два основных типа руд – золото-кварцевые малосульфидные и золото-кварцевые умеренно сульфидные, которые в дальнейшем сравниваются между собой и сопоставляются с россыпеобразующими формациями олова, платины и алмазов.

Бесспорно, что природный ряд гидротермальных руд золота значительно разнообразнее, нежели можно судить по двум выбранным нами для анализа россыпеобразующим формациям. Однако, из 33-х сегодня из

целей нашего исследования, мы полагали достаточным взять за основу эти два формационных типа руд золота, поскольку им, во-первых, принадлежит ведущая роль в россыпеобразовании и, во-вторых, они достаточно различаются между собой по отношению кремния и серы (кварца и сульфидов), чтобы можно было хотя бы в общих чертах уловить различия в их россыпеобразующих свойствах. По мере проведения исследований становилось все более очевидным, что степень окварцованности и сульфидности руд оказалась кардинальным свойством, определяющим россыпеобразующие особенности не только руд золота, но и руд другого важнейшего полезного ископаемого россыпей — олова.

### Россыпеобразующие формации олова

Группировка месторождений по степени их сульфидности, которой придерживаются В.И. Смирнов, Н.В. Петровская и многие другие исследователи, использована Е.А. Радкевич для выделения силикатно-кварцевой и силикатно-сульфидной групп оловорудных месторождений [122]. Среди них наибольшее промышленное, в том числе и россыпеобразующее [203], значение имеют касситерит-кварцевая, касситерит-силикатная и касситерит-сульфидная формации. По мнению одних исследователей [49], роль указанных формаций в добыче олова равна отношению 3:1, 5:1, по мнению других соответственно 8:10:11 [73].

При всей несхожести по целому ряду признаков золото- и оловорудные месторождения во многих отношениях занимают сходные тектоно-магматические и генетические позиции, что позволяет В.И. Смирнову относить их к одному и тому же классу плутоногенных гидротермальных месторождений. Именно поэтому, давая обобщенный минеральный состав руд кварцевого и сульфидного подклассов гидротермальных месторождений, В.И. Смирнов отнес к подклассу кварцевых объекты как с золотой, так и оловянной минерализацией (рис. 6). С нашей точки зрения, систематика оловянных месторождений по степени сульфидности и кварцевости руд также наиболее удобна, поскольку именно эти их особенности имеют важное значение для выяснения россыпеобразующей роли различных оловорудных коренных источников.

К касситерит-кварцевой формации А.В. Зильберминц с сотрудниками [221] относят рудопроявления, составляющие в пределах Северо-Востока Азии около половины общего числа оловянных проявлений. Рудопроявления тяготеют к терригенным (62%) или кислым интрузивным породам (34%). Рудные тела обычно представлены жилами мощностью от 1–2 до 30–50 см, иногда до 1–1,5 м, и чаще всего приурочены к трещинам скола. Содержание олова обычно колеблется в пределах нескольких процентов, достигая иногда исключительно высоких значений (до 60%). Срастания касситерита с другими минералами не типичны. В рудах касситерит образует разрозненные зерна, кристаллы до 10–15 мм длиной, гнездообразные скопления, прожилки, обычным является и вкрапленное распределение.

Минералы		Подкласс	
		Кварцевый	Сульфидный
Жильные	Кварц	+++++	
	Барит	+	+
	Флюорит		+
	Полевые шпаты	+	
	Хлорит	+	+
	Серицит	+	+
	Турмалин	+	
Сульфиды и их аналоги	Пирит		+++
	Пирротин		+
	Марказит		+
	Халькопирит		+++
	Халькозин		+
	Барнит		+
	Сфалерит		+++
	Галенит		+++
	Малибденит	+++	+
	Арсенопирит	+	+
	Висмутин		+
	Co и Ni сульфиды и арсениды		+
	Сульфосоли	Блеклые руды	
Сульфосоли Pb			+
Сульфосоли Ag			+
Сульфосоли Sn и Cr			+
Кислотные минеральные образования	Гематит	+++	
	Касситерит	+++	+
	Уранитит		
	Вольфрамит	+++	
	Швеллит	+++	
Элементы	Золото	+++	+
	Висмут	+	+

+++++ 1    +++ 2    + 3

Рис. 6. Распространение важнейших минералов в кварцевом и сульфидном подклассах плутогенных гидротермальных месторождений (по В.И. Смирнову, с изменениями)

1 - широко распространенные; 2 - средне распространенные; 3 - слабо распространенные

Крупность зерен довольно высокая - от 0,5 до 1,5 мм и крупнее. Наиболее тесно касситерит ассоциирует, по А.В. Зильберминцу и др. [49], с мусковитом, калиевым полевым шпатом, бериллом, вольфрамитом, арсенопиритом и флюоритом. Оловяносная минерализация нередко представлена в виде призальбандовых оторочек, гнезд, окружает ксенолиты вмещающих пород. Минеральные ассоциации касситерит-кварцевой формации включают до 82 минералов, из которых 62 встречаются лишь в отдельных рудопроявлениях и в виде очень мелких зерен. Содержание сульфидов в рудах данной формации в целом невелико, но может испытывать резкие колебания - от 1-2 до 40-60%.

Касситерит-силикатная формация характеризуется ассоциацией олова с железо-магнезиальными алюмосиликатами, прежде всего с турмалином и хлоритом. К этому типу месторождений относятся Корнуэлл (Англия), Квинсленд (Австралия), Сьюрд (Аляска) и ряд других. В нашей стране, кроме Северо-Востока, подобные месторождения известны в Приморье, Приамурье и других районах. По данным А.В. Зильберминца, максимум развития касситерит-силикатных рудопроявлений относится к более высоким горизонтам структурного разреза Северо-Востока, чем установлено для касситерит-кварцевой формации. Приуроченность же рудопроявлений к различным комплексам пород у сравниваемых формаций практически одинакова (в %): 62 - в терригенных, 32 - в интрузивных, 5 - в эффузивных и 1 - в карбонатных.

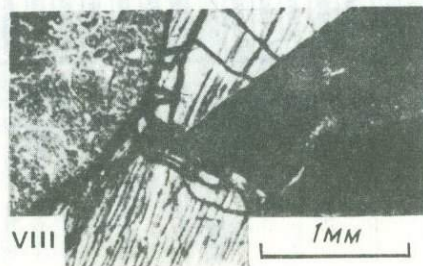
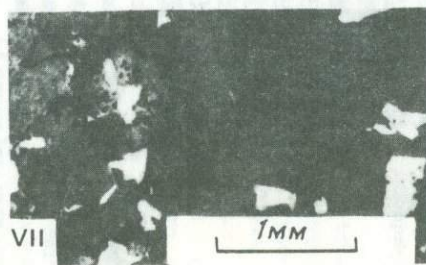
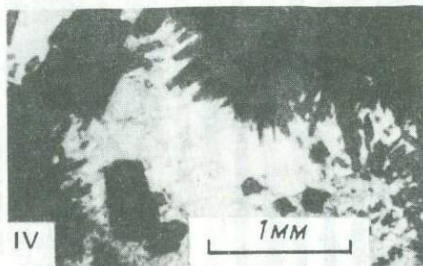
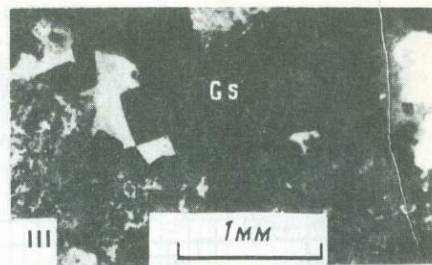
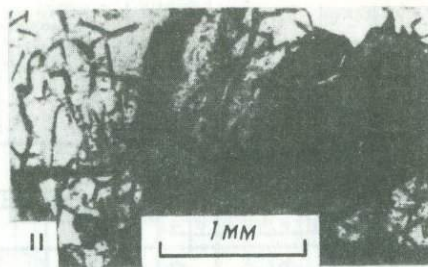
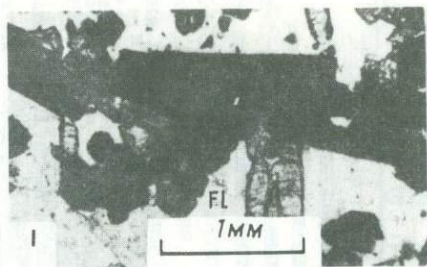
Минералы		Формация		
		кассите- рит-квар- цевая	кассите- рит-сили- катная	кассите- рит-суль- фидная
Жилные	Кварц	+++++	+++++	+++++
	Кальцит	+++	+++	+++++
	Альбит	+++++	+++	+
	К-Полевой шпат	+++++	+	+
	Каолинит	+	+++++	+++++
	Хлорит	+	+++++	+++
	Турмалин	+	+++++	+
	Мусковит	+++++	+	
	Гранаты	+	+	
	Аксинит	(+)	+	
	Везувиан		+	
	Топаз	+++++	+	
	Сидерит	+++	+++	+
	Флюорит	+++	(+)	+++
Сульфиды и их аналоги	Галенит	+	+++	+++++
	Сфалерит	+	+++	+++++
	Пирротин	+	+++++	+++++
	Халькопирит	+	+++	+++++
	Станнин	+	+++	+++++
	Пирит	+	+++	+++++
	Арсенопирит	+++	+++++	+++++
Кислороды, соединения	Гематит	+	(+++)	+
	Магнетит	+	(+++)	+
	Касситерит	+++	+++	+++
	Вольфрамит	+++	(+)	+
Элемен- ты	Серебро	+	+	+
	Золото	+	+	+
	Висмут	+	+	+
	Графит	+	+	+

+++++ 1    +++ 2    + 3    (+) 4    (++++) 5

Рис. 7. Важнейшие минералы главных россыпеобразующих формаций олова (по Е.А. Радкевич, А.В. Зильберминцу и др.)

1 - главные (более 10%); 2 - второстепенные (1-10%); 3 - редкие; 4 - редкие, иногда второстепенные; 5 - второстепенные, иногда главные

Морфологически рудные тела сходны с касситерит-кварцевыми - это жилы, жильные системы, штокверковые зоны. Содержание олова обычно в пределах 1-2%, очень редко достигает 8-10%. Олово распределено более равномерно, нежели в касситерит-кварцевых рудах. Отмечается меньшая крупность выделений касситерита, кристаллы этого минерала сложнее построены и редко достигают 10 мм в длину. Вместе с сопутствующими минералами касситерит цементирует зоны дробления, часто отлагается в зальбандах, образует теснейшие



взаимные прорастания с турмалином. Иногда наблюдается проникновение касситерита по трещинам спайности хлорита или пересечение хлоритовыми прожилками агрегатов касситерита. Интересно замечание А.В. Зильберминца и др. [49] о том, что тесная ассоциация касситерита с турмалином или хлоритом наряду с относительно малыми размерами зерен осложняет извлечение олова из руд. Эта же особенность оруденения заметно отражается на россыпеобразующей функции коренных источников касситерит-силикатной формации.

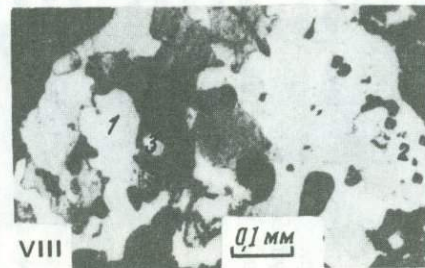
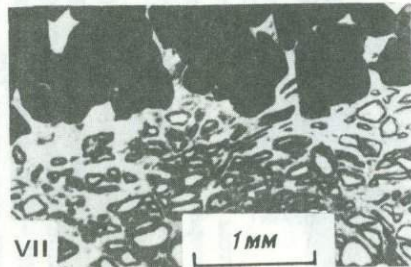
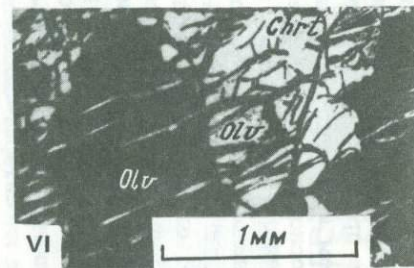
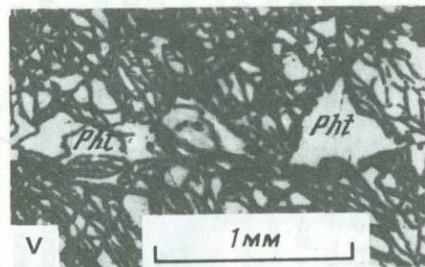
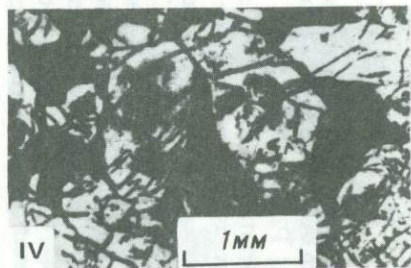
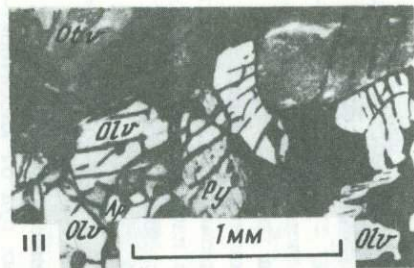
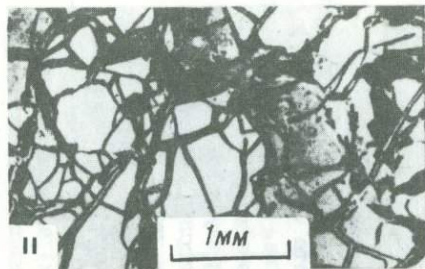
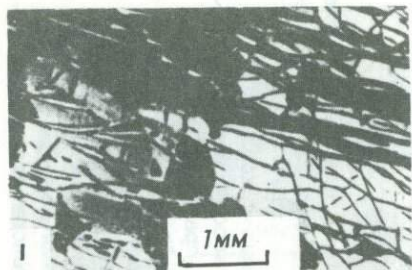
Гипогенный минеральный комплекс рассматриваемой формации близок к касситерит-кварцевым рудам. Из общего набора 86 минералов, встречающихся в обеих формациях, 54 минерала оказываются общими для той и другой формации, причем наиболее типична только часть минералов (рис. 7). Характерные для руд касситерит-кварцевой формации топаз, мусковит и альбит часто замещаются в рудах силикатного типа турмалином и хлоритом. Именно в этом и заключаются основные отличия касситерит-силикатных руд от касситерит-кварцевых: ассоциация олова с железо-магнезиальными алумосиликатами и боросиликатами (хлорит, турмалин) в первом случае и со щелочными алумосиликатами — во втором.

Касситерит-сульфидная формация резко отличается от рассмотренных выше двух формаций оловянного оруденения главным образом присутствием в ее рудах ассоциации касситерита с сульфидами и сульфосолями тяжелых металлов — свинца, цинка, меди, железа и др. (см. рис. 7). Предполагается, что формирование касситерит-сульфидных руд происходило в обстановке, характеризующейся весьма низким кислородным потенциалом. Некоторые исследователи не исключают, что рудопроявления этого типа могут переходить по падению жил в касситерит-кварцевые руды. В целом данная формация изучена недостаточно. Возможно, по этой причине выявленный для нее минеральный состав включает только 42 минерала. Касситерит представлен обычно мелкими зернами (до 1 мм), но образует скопления, гнезда, что в целом благоприятно для высвобождения касситерита в процессах выветривания и формирования россыпных месторождений.

---

Рис. 8. Микроструктуры сростаний касситерита с вмещающими (матричными) минералами (по А.Г. Бетехтину, С.Ф. Лугову, Б.В. Макееву, Т.М. Потаповой, Е.А. Радкевич)

I — касситерит-кварц-турмалиновая ассоциация с поздним флюоритом (F1); II — касситерит-альбит-кварцевая ассоциация; III — касситерит (Cs) в интенсивно альбитизированных гранитах; IV — турмалин (Ту)-касситерит-кварц (Q)-топазовая (То) ассоциация; V — касситерит (темное) с арсенопиритом, пересекаемый тонкими прожилками позднего скородита; VI — идиоморфные кристаллы касситерита (темные зерна) среди агрегата зерен пирита (светлое); VII — кварц (черное)-арсенопирит (белое)-касситеритовый (серое) агрегат; VIII — характер соотношений касситерита и арсенопирита, видны каемки скородита (C) вокруг выделений арсенопирита



Характеризуя перечисленные формации олова в целом в отношении их россыпеобразующего значения, можно отметить, что оно оценивается различно. По данным С.Ф. Лугова, Н.Г. Патьк-Кара и Т.М. Амичба, на территории СССР наибольшие скопления россыпного олова связаны с месторождениями и рудопроявлениями касситерит-кварцевой формации, в меньшей степени — с касситерит-силикатной и в ограниченных масштабах — с касситерит-сульфидной. Н.А. Шило и Г.Ф. Павлов [203] приводят несколько иные соотношения, отводя главное место в образовании россыпных месторождений касситерит-силикатной и касситерит-сульфидной формациям. Е.А. Радкевич [123] также отмечает значительную роль касситерит-сульфидной формации в пределах Тихоокеанского рудного пояса (месторождения Боливии, Мексики, Аляски, Монголии, Японии, Индонезии и др.). Таким образом, выше мы кратко рассмотрели пять россыпеобразующих формаций золота и олова, в которых постепенно меняется отношение кварца и сульфидов (от золото-кварцевой мало-сульфидной к касситерит-сульфидной). Помимо очевидных различий в минералогическом составе руд сравниваемых формаций, соответственно меняются и их текстурно-структурные особенности, проницаемость, крупность ценных минералов в рудах, характер их выделения и сростаний (рис. 8).

#### Россыпеобразующие формации платины

Россыпеобразующие формации металлов платиновой группы получили в литературе по геологии россыпей значительно меньшее освещение, чем формации золота или олова. Однако опубликованные результаты весьма детальных исследований платиноносности Южной Африки [16], в целом СССР [8] и восточных районов нашей страны

Рис. 9. Микроструктуры платиноносных гипербазитов (по А.Г. Бетехтину, А.Д. Генкину, А.А. Филимонову, Т.Н. Шадлун, Л.В. Разину, И.С. Рожкову и др.)

*I* — дунит среднезернистый серпентинизированный; *II* — среднезернистый дунит с редкими прожилками серпентина, структура панидиоморфнозернистая; *III* — перидотит (верлит), состоящий из моноклинного пироксена (*Py*), оливина (*Olv*) и апатита (*Ap*), структура типично гипидиоморфнозернистая; *IV* — пироксенит сидеронитовой структуры; *V* — метасоматический характер развития флогопита в серпентинизированном дуните (*Olv* — оливин, *Phl* — флогопит, *Chrt* — хромит); *VI* — метасоматический характер развития хромдиоксида (*Di*) в серпентинизированном дуните; *VII* — контакт сплошного хромшпинелида (темное) с дунитом (видна интенсивная серпентинизация дунита с образованием микропетельчатой структуры); *VIII* — секторально анизотропный агрегат брэггита (*1*) в сростании с иридийной пластиной (*2*) с включениями зерен и кристаллов оливина (*3*); *IX* — платина (белое) цементирует обломки хромита (серое) в серпентине (черное)

[116], а также наши наблюдения при посещении некоторых районов позволяют составить достаточно полное представление о коренных источниках платиновых металлов. Значительную помощь в исследованиях оказали нам также предоставленные для ознакомления коллекции металлоносных гипербазитов и шлихи, собранные Л.В. Разиным и его сотрудниками. Совместно с ними были выполнены некоторые опыты по моделированию поведения платиновых минералов в водной среде.

По П.Вагнеру, месторождения платины локализируются в массивах основных и ультраосновных пород. В частности, богатейшие месторождения Бушвельдского массива в Африке приурочены к норитам и дунитам. Платиноносные дуниты — это обычно крупнозернистые, хорошо раскристаллизованные породы, нередко имеющие пегматоидный облик. Минеральный состав пород довольно однороден (в %): гортонолит (93,2), диаллаг (5,0), роговая обманка (1,5), хромит (0,25), магнетит (0,05). Интересно замечание П.Вагнера о том, что "не имеется заметной разницы в составе дунита, богатого платиной, дунита, довольно бедного платиной, и дунита, совершенно лишенного платины" [16, с. 75].

В пределах Уральской платиноносной провинции месторождения платины расположены в породах габбро-перидотитового ряда, в дунитах и отчасти пироксенитах. Минералы платины парагенетически очень тесно ассоциируют с хромшпинелидами. А.Г. Бетехтин [8] в качестве платиноносных рудных тел рассматривал хромшпинелидовые образования в массивах гипербазитов. Хромшпинелидовое оруденение в дуните может давать однородные, пятнистые, линзовидные, прожилковые, петельчатые и брекчиевидные текстуры. Форма рудных тел весьма разнообразна: от широкообразных гнезд до жилиобразных неправильной формы ветвящихся тел. Нередки гнезда линзовидной формы, столбобразные скопления мелких рудных тел. Как отмечает А.Г. Бетехтин, какой-либо общей закономерности в расположении их среди массива не наблюдается ни с глубиной, ни в горизонтальных направлениях.

Выделения самородной платины и платиновых минералов бывают от очень крупных (самородки в сотни и тысячи граммов) до тонкой вкрапленности, различимой только под микроскопом. В качестве типичных представителей россыпеобразующих формаций платины могут рассматриваться также магматические комплексы Алданского щита и некоторых других районов на Востоке нашей страны. По И.С. Рожкову и др. [116], платиновое оруденение в пределах Алданского щита связано с дунитами и перидотитами. Свежие дуниты состоят из оливина с примесью хромшпинелидов, а серпентинизированные, кроме этого, содержат серпентин и дисперсный магнетит. Характерные микроструктуры дунитов (рис. 9) весьма сходны с аналогичными породами во всех платиновых районах (Урал, Африка, Аляска, Восток СССР).

Россыпеобразующее значение различных типов коренного оруденения весьма различно (табл. 2), что связано с особенностями их вещественного состава, главным образом с размерами выделений

Таблица 2

Россыпеобразующие формации платины (по Н.А. Шило, И.С. Рожкову, Л.В. Разину и др.)

Формация		Ассоциация магматогенных пород в платиноносных массивах	Главные и сопутствующие элементы руд	Типичные главные минералы руд	Россыпеобразующая продуктивность
материнская магматическая	рудная				
Гипербазит-габбровая	Медно-никеле-сульфидная	Дунит-кортландит-клинопироксенит-троктолит-габбронорит-перидотит	Pd, Pt (Au), Cu, Ni, (Cr, Ti), Co	Пирротин, халькопирит, пентландит, хромшпинелиды, титаномагнетит, кубанит	Ограниченная
Форстерит-дунитовая	Платино-хромитовая	Дунит-верлит-клинопироксенит	Pt, Ir, Os, Cr	Хромшпинелиды	Высокая, спектр россыпей от эповиальных до морских
Дунит-гарцбургитовая и перидотит-троктолитовая	Хромитовая	Дунит-перцолит-гарцбургит-серпентинит	Pt, Os, Cr	Хромшпинелиды	Значительная, характерны комплексные (Pt, Os, Ir, Au) россыпи
	Никеле-сульфидно-хромитовая	Дунит-перидотиты-серпентинит-троктолит	Pd, Pt, Cr, Ni	Хромшпинелиды, пирротин, пентландит	
Гипербазит-эклогит-габбровая	Никеле-сульфидная	Дунит-верлит-перцолит-горнблендит-клинопироксенит-эклогит	Pd, Pt, (Ro, Ru, Ir, Au), Ni	Пентландит, пирротин, халькопирит	Ограниченная
Габбро-норитовая	Титано-магнетитовая	Верлит-клинопироксенит-габбро-троктолит-норит	Pd (Pt), Ti, V, Cu	Титаномагнетит, халькопирит, борнит	Ограниченная
Габбро-диорит-гранодиоритовая	Медноколчеданная	Кварцевый диорит-порфирит-гранодиорит	Pd, Pt (Rh, Au, Ag), Cu	Халькопирит, борнит, пирротин, магнетит	Отсутствует
Габбро-монзонит-сиенитовая	Медно-порфировая	Трахилитарит-монзонит-диорит-порфир	Pd, Pt (Rh, Ag), Au, Cu, Mo	Халькопирит, молибденит, пирит	Отсутствует

Минерал		Источник оруденения		
		дунит	перидотит	пироксенит
Породообразующие	Оливин	++++	+++	
	Пироксен		+++++	+++++
	Серпентин	+++	++	
	Флогопит	++		
	Хлорит			
	Амфибол		+	
	Биотит		++	
	Апатит			+
	Кальцит	+	+	
Сульфиды и их аналоги	Сперрилит	+		
	Лаурит	+		
	Брэггит	+		
	Куперит	+		
	Пентландит	•		
	Халькопирит	•		
	Галенит	•		
	Пирит	•		
	Пирротин	•		
Окислы	Хромшпинель	+		
	Хромит	+		
	Магнетит	+		
	Титаномагнетит	•		
	Сфен			+
Элементы и их смеси	Платина	+		
	Сысертскит	+		
	Невьянскит	+		
	Нигглиит	•		
	Гессит	•		
	Золото	•		
	Серебро	•		
	Медь	•		

++++ 1    +++ 2    ++ 3    + 4    • 5

Рис. 10. Главнейшие минералы коренных источников минералов группы платины [116]

1 - резко преобладающие; 2 - часто встречающиеся в основной минеральной массе; 3 - присутствующие обычно в небольшом количестве; 4 - присутствующие в виде вкрапленности различной интенсивности; 5 - отмечающиеся весьма редко

минералов платины, с закономерностями тектоно-геоморфологической эволюции территории и с другими факторами. В целом россыпеобразующие формации платиноидов резко отличаются от рассмотренных выше формаций золота и олова практически по всем основным признакам: по минеральному составу (рис. 10), морфологии и условиям залегания платиноносных образований, структурно-магма-

гическому положению и т.д. Подобная контрастность россыпеобразующих формаций платины по отношению к рассмотренным выше позволяет отчетливее увидеть специфические особенности сравниваемых формаций по их россыпеобразующей функции. Следует отметить, что в некоторых отношениях россыпеобразующие формации платины не только различаются, но и сближаются, например, с золото-сульфидными формациями по наличию сульфидной минерализации. Это нередко приводит к шиховому парагенезису платиновых минералов с минералами золота в аллювии и к формированию комплексных россыпей.

### Россыпеобразующие формации алмазов

Единичные находки алмазов известны в ультраосновных глубинных породах, в космическом веществе, а в некоторых случаях источник их не устанавливается однозначно, хотя скопления могут достигать промышленных масштабов. Поэтому выделение россыпеобразующих формаций алмазов целесообразно только в отношении главного, если не единственного коренного источника алмазов, образующего россыпные месторождения, — кимберлитовых проявлений. БИ. Прокочук [121] полагает, что первоисточником россыпей, кроме кимберлитовых тел, могут быть также более древние россыпи различных генетических типов. Однако в связи с недостаточной изученностью этого вопроса мы будем рассматривать только одну россыпеобразующую формацию — кимберлитовую. При этом следует иметь в виду, что в дальнейшем в составе этой формации могут быть выделены подформации, различающиеся между собой россыпеобразующими свойствами, но постановка и решение такой задачи представляются делом будущего.

По форме залегающих кимберлитовые тела могут иметь вид трубок, даек, жил и силлов. Содержание алмазов даже в богатых кимберлитовых трубках составляет лишь несколько сотысячных долей процента от общей массы породы. Выделяется несколько типов кимберлитов, из которых главное значение имеют четыре: кимберлитовые туфы, кимберлитовые брекчии, базальтоидные и магматические кимберлиты. В принципиальном отношении выделенные типы достаточно сходны (по степени устойчивости к процессам выветривания, минеральному составу и морфологии). Наиболее типичные коренные источники алмазов — это субвертикально уходящие на глубину трубообразные тела, сложенные брекчиевидной породой, состоящей из обломков собственно кимберлитов и разнообразных включений, сцементированных серпентин-карбонатным цементом. Основную массу выполнения кимберлитовых тел наряду с обломками собственно кимберлитов и фенокристаллами оливина составляют ксенолиты пород осадочного происхождения, захваченные преимущественно из нижележащих горизонтов осадочного комплекса, обломки траппов и других вмещающих пород, преимущественно осадочно-карбонатного ряда. Кристаллические породы изверженного происхождения и эклогиты довольно редки и в общей массе кимберлитов составляют незначительный объем.



Минералогический состав кимберлитов отличается исключительным постоянством, хотя количественные соотношения одних и тех же минералов в разных типах и в отдельных трубках варьируют в значительных пределах [1]. Об этом же свидетельствуют и данные по африканским алмазным месторождениям. Одним из главных минералов кимберлитов является оливин (рис. 11), относящийся к двум генерациям. К первой принадлежат сравнительно крупные выделения оливина (до 10–12 мм в поперечнике), придающие породе порфиновый облик. Оливин этой генерации образует сростания с пиропом, ильменитом, хромитом, а в качестве включений отмечается также в кристаллах алмаза. В свежем состоянии оливин первой генерации встречается в плотной массе базальтоидных кимберлитов. В брекчиевидных кимберлитах оливин интенсивно серпентинизирован. Оливин второй генерации характеризуется преимущественно мелкими зернами и составляет основную массу кимберлита. Отмечается [1], что оливин второй генерации обычно серпентинизирован.

Пироксены в кимберлитах представлены хромдиопсидом в виде зерен неправильной формы размером 1–3 мм в поперечнике. Довольно типичен флогопит, встречающийся в виде рассеянных пластинчатых зерен и тонких чешуек в связующей массе. Размеры зерен от 0,5 мм до 1–2 см. Во всех кимберлитовых трубках отмечается перовскит в виде мелких (0,02–0,2 мм) кристалликов кубической формы. Важное значение в минеральном составе кимберлитов имеют гранаты, в особенности пироп, встречающийся в различных количествах во всех трубках, иногда в виде переходных разновидностей от пироба до альмандина. В большинстве случаев пироп в кимберлите представлен округлыми, овальными, реже угловатыми зернами размером до 1–2 см при средних размерах зерен 2–3 мм.

Характер сростаний алмазов с вмещающими минералами и вообще агрегатная форма нахождения алмазов во вмещающей среде изучены слабо. В качестве включений в алмазах нередко отмечаются оливин, пироп, магнетит, графит. Известны сростания типа алмаз в пиропе, алмаз в алмазе. В южноафриканских месторождениях наблюдались включения алмазов в оливине, пиропе, хромдиопсиде. По данным А.П. Бобривича и др. [1], в трубке Мир встречено сростание эклогита с алмазами.

Рис. 11. Характерные петрографические структуры кимберлитов [1]

*I* – кимберлит базальтового облика, видны крупные обломки оливина 1-й генерации в основной массе из мелких зерен оливина 2-й генерации; *II* – кимберлитовая брекчия из обломков магматического кимберлита, известняков, сланцев и других, сцементированных тонкозернистыми массами карбоната и серпентина; *III* – пироксенит (энстатит) с зернами гранат-пироба, окруженного келифитовыми каймами; *IV* – эклогитоподобная порода: агрегаты зерен граната, моноклинного пироксена с зернами плагиоклаза, в центре – зерно рутила (черное) в плагиоклазе

Минерал		Собствен- но кимбер- литов	Включе- ный радис- твенных пород	Ксеноли- тов чуж- дых пород	Наложен- ной мине- рализации
Основной, связующий массы и ксеролитов	Оливин	+++++	++		
	Пироксен	+++	+		
	Флогопит	++			
	Апатит	++		+	
	Перовскит	+++			
	Серпентин				++
	Амфибол			+	
	Хлорит				+
	Кварц			+	+
	Калишлат		+	+	
	Плагиоклаз		+	+	
	Гиперстен			+	
	Карбонаты				++
	Биотит			+	
	Дистен		+	+	
	Циркон		+	+	
Пиропы	++	+	+		
Сульфиды и сульфаты	Пирит				+
	Сфалерит				+
	Галенит				+
	Миллерит				+
	Халькопирит				+
	Варит				+
	Целестин				+
Окислы	Хромит	+	+		
	Шпинель	+			
	Ильменит	++		+	
	Магнетит	+		+	++
	Рутил		+		
	Сапфир		+		
Эле- менты	Муассанит		+		
	Графит	+		+	
	Алмаз	+			

+++++ 1    +++ 2    ++ 3    + 4

Рис. 12. Минеральный состав кимберлитовых тел [1]

Минералы: 1 - резко преобладающие; 2 - встречающиеся в заметных количествах; 3 - постоянно присутствующие; 4 - редкие и аксессуарные

Среди рудных минералов кимберлитов одним из наиболее широко распространенных является ильменит. Отдельные порфиоровые выделения ильменита встречаются в основной массе базальтоидного кимберлита, а в виде округлых зерен и обломков - в брекчиевидном кимберлите. Размеры зерен ильменита обычно от десятых долей миллиметра до 3-5 мм, иногда встречаются желваки до 3-5 см в диа-

метре. Вторым по распространенности рудным минералом кимберлитов является магнетит, форма нахождения которого в породе сходна с присущей ильмениту.

Наложенная минерализация в кимберлитах обычно выражена проявлениями аутометаморфизма, гидротермальными и гипергенными изменениями. Среди вторичных минералов обычны серпентин, развивающийся по оливину, а также серпофит, хлорит, кальцит и др. Интересно отметить, что почти во всех кимберлитовых трубках наблюдается сульфидная минерализация, представленная главным образом пиритом, изредка пирротином, сфалеритом, галенитом и халькопиритом. А.П. Бобревич и др. [1] связывают сульфидизацию с постмагматическими гидротермами. Таким образом, кимберлиты, как коренные источники алмазов для образования россыпных месторождений, представляют собой крупнокристаллические породы с резким преобладанием небольшого числа (рис. 12) минералов, слабо устойчивых при выветривании. По своему химическому составу кимберлиты сближаются с россыпеобразующими формациями платины, отличаясь от них еще более высокой основностью. Кимберлитовая формация замыкает ряд рассмотренных нами формаций, в начале которого стоят ультракремнеземистые рудные образования, а в конце — практически бескварцевые. Целесообразно проанализировать важнейшие особенности охарактеризованных выше формаций.

#### Сравнительный анализ россыпеобразующих формаций золота, платины, олова и алмазов

Из приведенного выше, хотя и краткого описания россыпеобразующих формаций достаточно ясно видно, насколько широк спектр формационных, генетических и минералогических различий коренных источников россыпей. Эти отличия находят выражение прежде всего в химическом составе рудного материала коренных месторождений. Однако встречающиеся в геологической литературе химические анализы руд и продуктивных горных пород рассеяны в большом числе различных публикаций. В результате весьма длительной и кропотливой работы удалось обобщить около 200 химических анализов (в среднем по 30–35 для каждой формации). Полученные средние величины (табл. 3) сопоставлены с валовыми химическими анализами руды, с различными кадастровыми, справочными и другими данными. Это сравнение показало удовлетворительную сходимость наших подсчетов (отклонение по главным компонентам оказалось в пределах среднеквадратичной ошибки усреднения).

Еще большие затруднения встретились при обобщении минералогических анализов, относящихся к рудам различных россыпеобразующих формаций, поскольку во многих случаях имеющиеся в литературе сведения о минералогическом составе руд носят скорее качественный, чем количественный, характер. И все же, несмотря на известную условность полученных усредненных данных о минеральном составе коренных источников россыпей, они вполне отражают принципиальные различия между рассматриваемыми формациями (рис. 13).

Таблица 3

Средний химический состав руд россыпеобразующих формаций золота, олова, платины и алмазов

Компо- нент	Формация						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
SiO <sub>2</sub>	97,86	59,81	80,81	60,81	52,04	38,08	29,80
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,80	0,12	0,53	0,41	-	1,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,62	15,87	6,85	15,72	13,76	1,23	3,31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	4,62	0,91	5,84	8,11	1,47	6,73
FeO	0,16	3,47	3,45	2,18	3,76	4,88	1,83
CaO	0,20	1,52	0,58	0,96	0,99	0,37	9,82
MgO	0,13	1,75	0,32	1,01	0,98	46,06	27,94
MnO	0,03	0,06	0,10	0,06	0,13	0,08	0,13
K <sub>2</sub> O	0,13	2,93	1,52	1,80	0,98	0,25	0,25
Na <sub>2</sub> O	0,10	3,42	0,88	1,03	0,63	0,08	0,29
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,07	2,34	0,82	1,50	2,45	-	-
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,15	0,69	0,22	0,54	0,95	-	1,82
S	0,18	1,06	0,47	1,24	4,22	-	0,22
SO <sub>3</sub>	-	0,90	0,07	0,28	0,89	-	-
CO <sub>2</sub>	0,13	-	0,09	0,33	0,54	1,70	2,44
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,04	0,03	2,23	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,17	0,17	0,20	0,13	0,07	0,38
As	0,13	1,48	1,22	1,19	0,54	-	-
SnO <sub>2</sub>	-	-	1,57	1,39	2,36	-	-
WO <sub>3</sub>	-	0,03	0,38	0,15	0,39	-	-
Cu	-	0,04	0,03	0,12	0,35	-	-
Zn	-	0,01	0,01	0,22	0,83	-	-
Pb	-	сл.	0,02	0,15	0,07	-	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	0,36	0,14
NiO	-	-	-	-	-	0,25	0,11
П.п.п.	0,66	-	-	-	3,69	5,13	13,99
Сумма	100,98	100,81	100,64	99,48	99,17	99,91	100,72

\* Формация: I - золото-кварцевая малосульфидная, II - золото-кварцевая умеренно сульфидная, III - касситерит-кварцевая, IV - касситерит-силикатная, V - касситерит-сульфидная, VI - дунитовая, VII - кимберлитовая.

Таким образом, мы подошли к одной из главных идей нашего исследования. Она состоит в том, что противоречивость и дискуссионность отмеченных выше представлений и Ю.А. Билибина, и многих других исследователей о роли выветривания в россыпеобразовании вытекали из недостаточного учета конкретных особенностей вещественного состава коренных источников и влияния этих особенностей на процесс формирования россыпи за счет источника именно данного

Таблица 4

Сравнительная устойчивость типичных руд и продуктивных пород россыпеобразующих формаций в зоне гипергенеза

Формация	Отношение числа устойчивых минералов к неустойчивым	Сравнительная устойчивость формаций
Золото-кварцевая малосульфидная	0,93	1,00
Золото-кварцевая умеренносульфидная	0,19	0,20
Золото-сульфидная	0,03	0,03
Касситерит-кварцевая	0,63	0,68
Касситерит-силикатная	0,30	0,33
Касситерит-сульфидная	0,18	0,19
Дунитовая	0,04	0,04
Кимберлитовая	0,05	0,05

типа. В действительности же разные формационные типы источников в зависимости от сочетания энергетических, физико-химических, литогенетических факторов дают широкий спектр условий россыпеобразования, в котором роль климата и различных деструктивных агентов выветривания может варьировать в значительных пределах. Речь идет, следовательно, о том, что разные формационные типы руд обладают различной "технологичностью" в том природном обогащательном цикле, который осуществляется эрозивно-денудационными процессами в зоне гипергенеза.

Неравнозначность поведения руд различных формаций при выветривании хорошо подтверждается произведенными подсчетами соотношения устойчивых и неустойчивых минералов в рудной или продуктивной массе (табл. 4).

Из приводимых в таблице данных следует, что степень устойчивости различных формационных типов коренных источников россыпей может различаться от 2-3 до 20-25 раз. Необходимо отметить еще одну особенность, определяющую поведение россыпеобразующих формаций по отношению к вмещающим породам. В одних случаях, как, например, в коренных месторождениях платины, рудные и безрудные породы не отличаются между собой какими-либо признаками. Ясно, что процессы выветривания таких коренных источников не будут отличаться от выветривания обычных пород того же состава. В других случаях рудные тела весьма резко выделяются на фоне вмещающих пород (табл. 5) и процессы выветривания рудных и боковых пород протекают совершенно различно.

Итак, суммируя изложенные выше данные об особенностях различных россыпеобразующих формаций, нельзя не прийти к заключению,

Минералы	Формации золота			Формации олова			Плати-ны	Алма-зов
	Квар-цевая мало-сульф.	Квар-цевая умеренно-сульфидн.	Сульфид-ная	Касси-терит-квар-цевая	Касси-терит-сили-катная	Касси-терит-суль-фидная	Дуни-то-вая	Ким-берли-товая
Жильные и породообразующие	Кварц	+++++	++++		+++++	+++++	+++++	
	Полевшпаты	+	+		+++++	+	+	
	Хлорит	•	+	+	+	+++++	+++	
	Флюорит		+	+	++	+	+++	
	Турмалин		+		+	+++++	+	
	Каолинит	•			+	+++++	+++++	
	Мусковит	+	+		+++++	+	+	
	Топаз	+	+		+++++	+	+	
	Карбонаты		+		+++	+++	+++++	+
	Барит			+				
	Берилит	+	+	+				
	Гранаты							+
	Аксинит	•			+	+		
	Везувит					+		
	Оливин						+++++	+++++
	Пироксен		+					+++
	Серпентин						+++	
Флогопит							++	
Биотит		+						
Апатит	•	+						
Перовскит							++	
Эпидот							++	
Сульфиды и их аналоги	Пирит	+	++	+++	+	+++++	+++++	•
	Пирротин	+	++	+++	+	+++++	+++++	•
	Марказит		+	+		+++++	+++++	•
	Халькопирит			+++	+	+++	+++++	•
	Халькозин	+	+	+				
	Кобеллин		+	+				
	Барнит		+	+				
	Сфалерит	•	+	+++	+	+++	+++++	
	Галенит	+	+	+++	+	+++	+++++	•
	Молібденит			+				
	Арсенопирит	+	+	+	+++	+++	+++++	
	Висмутин	+	+	+	+++	+++	+++++	
	Со и Мг Сульфиды и Арсениды			+				
	Станнин				+	+++	+++++	
Сперилит							+	
Лаурит							+	
Бреггит							+	
Куперит							+	
Лентландит							•	

+++++ 1    ++++ 2    +++ 3    (++) 4    ++ 5    (++) 6    + 7    (+) 8    • 9  
 ----- 10    ----- 11    ----- 12    ----- 13    ----- 14

Минералы	Формации золота			Формации олова			Платины	Алмазов
	Кварцевая мало-сульф.	Кварцевая умеренно-сульфидная	Сульфидная	Касситерит-кварцевая	Касситерит-силликатная	Касситерит-сульфидная	Дунитовая	Кимберлитовая
Сульфидные фосфаты	Блеклые руды	+	+	+				
	Сульфосоли Pb			++				
	Сульфосоли Ag			++				
	Сульфос. Sn, Cu			++				
Кислородные соединения	Гематит			+	+++	+		
	Касситерит			+	+++	+++		
	Магнетит	+	+	+	(+++)	+	+	+
	Вольфрамит		+	+++	+	+		
	Шеелит	+	+					
Оксиды	Хромшпинель						+	
	Уромит						+	+
	Углеродмагнетит						•	
	Сфен							
	Шпинель							
	Ильменит	+	+					++
Элементы и их смеси	Рутил		+					
	Золото	++	++	+	+	+	•	
	Висмут	+	+	+	+	+		
	Серебро				+	+	•	
	Медь				+	+	•	+
	Платина						+	+
	Сысертский						+	
	Невьянский						+	
	Нигелиит						•	
	Гессит						•	
	Графит				+	+		+
	Алмаз						+	+

Рис. 13. Главнейшие минералы россыпеобразующих формаций золота, олова, платины и алмазов

1 - преобладающие; 2 - присутствующие в значительном количестве; 3 - второстепенные; 4 - второстепенные, иногда главные; 5 - аксессуарные; 6 - аксессуарные, иногда в значительном количестве; 7 - встречающиеся редко; 8 - иногда встречающиеся в заметных количествах; 9 - нехарактерные; 10 - присутствие не установлено; 11 - весьма устойчивые, 12 - устойчивые; 13 - умеренно устойчивые; 14 - неустойчивые

что поведение столь широкого спектра россыпеобразующих формаций в зоне гипергенеза не может быть объяснено на основе универсальной схемы выветривания, как это делалось до сих пор в геологии россыпей.

Преодоление такого ошибочного методологического подхода важно для будущего науки о россыпях. В развитии геологии россыпей весьма ярко проявилась нередко свойственная описательным наукам ошибка подмены понятий: понятие о выветривании и разрушении коренных источников подменено понятием выветривания вооб-

А

Минерал	Порода		
	Гранит	Диорит	Дунит
Кварц	+++	+	
Ортоклаз и микропертит	+++++	+	
Олигоклаз	+++		
Андезин		+++++	
Биотит	++	++	
Амфибол	+	+++	
Пираксены		++	+
Оливин			+++++
Магнетит	+	+	+

+++++ 1    +++ 2    ++ 3    + 4  
Кварц 5    Олигоклаз 6    Андезин 7    Оливин 8

Б

Компонент	Порода		
	Гранит	Диорит	Глинистые сланцы
SiO <sub>2</sub>	70,18	56,77	58,10
TiO <sub>2</sub>	0,39	0,84	0,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,47	16,67	15,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,57	3,16	4,02
FeO	1,78	4,40	2,45
MnO	0,12	0,13	—
MgO	0,88	4,17	2,44
CaO	1,99	6,74	3,11
Na <sub>2</sub> O	3,48	3,39	1,30
K <sub>2</sub> O	4,11	2,12	3,24
H <sub>2</sub> O	0,84	1,36	5,00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,25	0,17
CO <sub>2</sub>	—	—	2,63
SO <sub>3</sub>	—	—	0,64
G	—	—	0,80

Рис. 14. Минеральный (А) и химический (Б) состав наиболее типичных изверженных и осадочных пород, часто являющихся рудовмещающими для месторождений золота и олова (по Э.Ларсену и Р.Дэли)

1 — минералы с содержанием до 40–60%; 2 — минералы с содержанием 10–25%; 3 — минералы в количестве до 10%; 4 — минералы в количестве до 5%; 5 — весьма устойчивые минералы; 6 — устойчивые; 7 — умеренно устойчивые; 8 — неустойчивые

Таблица 5

Химический состав рудных тел золото-кварцевой малосульфидной формации и вмещающих пород одного из месторождений Чукотки\*

Компонент	Рудное тело в гидротермально измененных диа-базах			Рудное тело в сланцах	
	висячий зальбанд	рудная жила	лежачий зальбанд	рудная жила	0,5 м от зальбанда
SiO <sub>2</sub>	43,54	98,48	43,16	94,36	55,03
TiO <sub>2</sub>	2,31	0,03	2,38	0,06	0,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,02	0,64	9,15	2,67	24,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,26	0,43	12,94	0,67	5,61
FeO	11,40	0,14	4,36	0,01	0,64
MnO	0,20	0,01	0,09	Сл.	0,07
MgO	6,00	0,10	1,98	0,23	0,69
CaO	4,61	0,10	4,04	0,04	0,73
K <sub>2</sub> O	1,25	0,05	0,20	0,75	5,04
Na <sub>2</sub> O	2,12	-	4,64	0,15	0,64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,21	0,01	0,25	0,04	0,26
CO <sub>2</sub>	5,57	-	6,12	0,91	0,14
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	5,19	0,05	1,50	0,26	4,49
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,28	0,08	0,21	0,12	0,67
F	0,05	Сл.	0,03	Сл.	-
S <sub>общ</sub>	-	0,12	3,46	0,01	Сл.
As	-	Сл.	6,97	Сл.	0,65
Сумма	100,01	100,24	101,48	100,28	99,63

\* По материалам Н.М. Давиденко и автора.

ше, заимствованным из физической географии, почвоведения и отчасти геоморфологии. В этих науках представление о выветривании сформировалось при наблюдении процессов разрушения обычных фоновых интрузивных и осадочных пород, довольно значительно отличающихся от россыпеобразующих формаций своим минералогическим и химическим составом (рис. 14).

Не всегда в полной мере принимался во внимание и тот факт, что вещественный состав россыпеобразующих формаций сам по себе является главнейшим фактором россыпеобразования. К числу главных факторов формирования россыпных месторождений относили обычно климатические, тектонические, геоморфологические, а металлогенетический фактор хотя и признавался в качестве неперемного условия россыпеобразования, однако не более чем в форме самой общей констатации. Вопрос же заключается в том, чтобы, взяв за основу физико-химические особенности руд и продуктивных горных пород, проследить их значение во взаимодействии с экзогенными факторами, действующими в зоне гипергенеза.

Академиком А.Е. Ферсманом высказана мысль о том, что все многообразие мировых констант вещества, энергии, свойств должно свестись к одной системе, где управлять законами природы будут основные энергетические параметры атома. Выше нами отмечалось, что к идее энергетической обусловленности процессов литогенеза обращались многие исследователи. Именно энергетический принцип принадлежит к тем фундаментальным основам, на которых должно развиваться учение о россыпях как специфическом литогенетическом и геохимическом явлении.

### Энергетические принципы теории литогенеза и формирования россыпных концентраций

К оценке факторов выветривания и поведения рудного вещества в зоне гипергенеза вполне приложима геозенергетическая теория А.Е. Ферсмана, в основе которой лежит представление об энергии кристаллической решетки [140]. С более общих позиций подходит к трактовке геозенергетических процессов Г. Рамберг [130], выделяя: процесс механической транспортировки, управляемый нарушениями механического равновесия и стремлением к устойчивому механическому равновесию; химический процесс, включающий диффузионную транспортировку, он вызывается нарушением химического равновесия и стремится к химическому равновесию; процесс тепловой транспортировки [130].

А.А. Сауков [139] придавал главнейшее значение в процессах на поверхности Земли энергии тяготения, проявляющейся в основном в механической форме, и солнечной энергии, принимающей участие в тепловом балансе Земли через биологическую, физико-механическую и химическую формы.

В геоморфологии энергетические принципы рельефообразования прослеживаются от работ В. Пенка в начале нашего века до фундаментальных исследований Л. Кинга [62] и многих советских ученых. В частности, В.П. Философов обратил внимание на то, что в поле силы тяжести Земли процессы эрозии, денудации и аккумуляции зависят не от геометрической разности высот, а от разности геопотенциалов, в которую как составная часть входит и разность геометрических высот [174]. Поэтому любое поднятие того или иного участка земной поверхности приводит к увеличению потенциальной энергии зоны поднятия. Появившаяся вследствие этого разность геопотенциалов между зоной поднятия и прилегающей к ней поверхностью обуславливает неустойчивость зоны поднятия, так как состояние с относительно большей энергией менее устойчиво. Это неустойчивое состояние разрешается возрастанием скорости течения водотоков, эродирующих зону поднятия, увеличением темпа сползания склоновых масс, т.е. процессов, ведущих к устранению разности геопотенциалов. Однако, помимо этих геомеханических процессов выравнивания геопотенциалов, тенденция к удалению избыточной массы из зоны поднятия в большинстве случаев сопровождается переводом гор-

ных пород в зоне поднятия в такое состояние, при котором составляющее их вещество становится более подвижным, легче транспортируется агентами денудации. Движущей же силой, энергетически обусловленной тенденцией этого процесса, является стремление вещества перейти в новое, энергетически более устойчивое состояние. Например, распад одиночной глыбы на водоразделе приводит ее в наиболее равновесное состояние относительно данного конкретного участка. Но распад глыбы осуществляется в результате разрыва межзерновых, междолинных и межатомных связей и требует затрат внешней энергии. Таким образом, возникает представление о физическом единстве морфолитогенетических процессов, идущих на различных энергетических уровнях, отражающих, в частности, иерархический ряд: энергия — квант — ядро — атом — молекула — кристаллическая решетка — минерал — минеральный парагенезис [181].

Для целей нашего исследования энергетическую иерархию морфолитогенетических процессов можно условно представить состоящей из пяти уровней (табл. 6). Анализ соподчиненности энергетических взаимодействий показывает, что различные факторы в зоне гипергенеза, ведущие к разрушению руд и горных пород, высвобождению из них полезных минералов и т.д., действуют хотя и одновременно, но в различных соотношениях. В частности, энергия климатических факторов, наиболее эффективно проявляющаяся на IV и V энергетических уровнях, является той составляющей выветривания, которая доводит вещество горных пород и руд до максимально возможного в условиях земной поверхности устойчивого состояния. Наиболее крупные морфоструктурные элементы земной поверхности оказываются внезональными [62], так как они обусловлены действием преимущественно сил тяготения и эндогенных сил, проявляющихся на I и II энергетических уровнях.

Группировка энергетических факторов целесообразна для всех литогенетических процессов, идущих на разных уровнях. Природные процессы всегда идут по энергетически наиболее выгодному пути (с наименьшими затратами энергии). Поэтому если пай приходящей энергии невелик (например, климатической) по сравнению с другими энергетическими составляющими (гравитационными, геомеханическими), то и морфолитогенетический процесс может проявиться только на уровнях, соответствующих преобладающей энергии. Известно, что чем меньше по своим размерам частица вещества, тем большей удельной внутренней энергией связи она обладает. Следовательно, для доведения литогенетического процесса, например выветривания, до пятого энергетического уровня взаимодействий необходим интенсивный приток не гравитационной или механической энергии, а таких ее форм, которые разрешают появление химических взаимодействий (тепловой, солнечной).

Таким образом, важно иметь в виду, что физические процессы всегда протекают на более низком энергетическом уровне, чем биологические или химические. При физическом выветривании требуется разрушить меньшее число связей в веществе руды или породы. Данное обстоятельство имеет принципиальное значение для понима-

Таблица 6

Энергетические уровни морфолитогенетических процессов

Соподчиненность уровней	Типичный пример форм и процессов	Масса взаимодействующих объектов, г	Линейный размер масс, см
I (мегауровень)	Горные системы, взаимодействующие на глубине с протяженными магматическими зонами	$2,7 \cdot 10^{23}$	$n \cdot 10^8$
II (макроуровень)	Горные хребты и отвечающие им зоны тектонической активизации антиклинорного типа	$2,7 \cdot 10^{20}$	$n \cdot 10^6$
III (мезоуровень)	Ледниковые и водные потоки, обломки переносимого материала	$2,7 \cdot 10^{12}$ $2,7 \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10^4$ $n \cdot 10^{-1}$
IV (микроуровень)	Температурные дислокации, распад единичных минеральных зерен и агрегатов	$2,7 \cdot 10^{-3}$ $2,7 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-3}$ $n \cdot 10^{-4}$
V (атомный)	Переходы электронов на разные энергетические уровни, возникновение и разрушение атомно-ионных связей	$1,66 \cdot 10^{-24}$	$n \cdot 10^{-8}$

ния механизмов высвобождения полезных минералов при россыпеобразовании. Из высказанных соображений следует, в частности, что для сегрегации ценных минералов из вмещающего рудного вещества во многих случаях оказывается достаточно простого физического дробления рудного материала без участия значительного химического воздействия.

Энергетическая обусловленность литогенетических процессов, в том числе и россыпеобразования, может быть прослежена на всех стадиях седиментационного цикла — от мобилизации материала на водосборных площадях до осаждения в конечных водоемах стока, от гравитационного обособления россыпеобразующих минералов в водно-аллювиальной среде до сорбирования субколлоидных фракций ценных металлов органическим веществом, глинистыми частицами, и т.д. Именно в этом мы видим удивительное единство литогенетических процессов, предсказанное геоэнергетической концепцией А.Е. Ферсмана.

## Особенности исходного состояния рудного вещества

Вопрос о том, что происходит с рудными телами от момента завершения их кристаллизации и до момента выведения в зону гипергенеза, исследован крайне слабо. Н.Б. Вассоевич полагает, что между стадией собственно выветривания (собственно гипергенеза или идиогипергенеза), протекающего в аэробной обстановке, и пострудной стадией имеется еще стадия криптогипергенеза, развивающаяся в анаэробных условиях. Поэтому можно полагать, что особенности исходного состояния рудного материала обнаруживают свое значение уже на стадии криптогипергенеза, исследование процессов которого непосредственно в нашу задачу не входит.

Состояние рудного тела как физико-химической системы определяется многими факторами. Прежде всего оно обладает определенной энергией, запасенной при образовании еще в эндогенную стадию [141]. Эта энергия заключена в кристаллохимических связях атомов и молекул, составляющих рудное тело. При равновесном состоянии энергетической системы (рудного тела) с окружающей средой никаких изменений не происходит и рудное тело может бесконечно долго находиться в неизменяемом состоянии. Процессы, ведущие к физико-химическим преобразованиям рудной системы, представляют собой реакцию рудного вещества на изменение параметров состояния — температуры, давления или кислородного потенциала. При этом важнейшее значение в состоянии рудного вещества приобретает фактор его неоднородности — структурной, химической, прочностной и т.д.

Неоднородности рудного вещества, как и минеральных систем в целом, рассматриваются в современной геологии как важная проблема в познании строения геологических тел. Н.В. Петровская [113] классифицирует элементы неоднородности (в мм) на крупные (более 0,5), мелкие (0,5–0,05), очень мелкие (0,05–0,005), тонкие (0,005–0,001) и ультратонкие (менее 0,001). Этот ряд можно было бы продолжить до атомарного уровня, дефектов кристаллической решетки, дислокаций и т.д. Роль неоднородности в любых физико-химических процессах определяется тем, что ее границы являются местами концентрации пор, примесных атомов, микровключений других минералов. Н.В. Петровская полагает, что элементы унаследованной неоднородности проявляются в кристаллах и зернах, образовавшихся при раскристаллизации гелей в виде микровключений реликтовых минералов. Сингенетическая неоднородность обнаруживается в виде микроразнонального строения в минеральных индивидах, в появлении колоний дислокаций и других дефектов кристаллической решетки. Послойные различия параметров кристаллической решетки отмечаются, например, у кристаллов кварца, что связывается с изменявшимися термодинамическими условиями минералообразования [113]. Широко распространена также мозаичность индивидов минералов — их расчлененность на мельчайшие блоки, несколько смещенные относительно друг друга. Деформации и перекристаллизации рудного вещества при завершении рудного процесса или в пострудную стадию создают эпигенетическую неоднородность.

Таблица 7

Факторы состояния рудного вещества на стадии криптогипергенеза

Физико-химическая и структурная неоднородность	Факторы неоднородности силовых полей и деформаций	
	эндолитогенные	тектонно-геоморфологические
Неоднородность минеральных сростаний	Дефекты кристаллизации: напряжения стесненного роста, паразитные грани нарастания [75]	Деформации сжатий, сдвигов, растяжений (катаклиз и милонитизация)
Неоднородность минеральных индивидов:	Деформации встречной диффузии с образованием дисперсной фазы [58]	Деформации снятия остаточных напряжений (при удалении денудированного слоя, гляциальной изоляции и т.д.)
а) унаследованная (микровключения, микропоры)	Эффект раскрытия пор и микротрещин в структуре вещества при пластической деформации	Напряжения криометаморфического стресса
б) сингенетическая (микроразональность, мозаичность, скопления дислокаций)	Дополнительная концентрация напряжений на границах двух сред: кварц-золото, кварц-сульфид, сульфид-золото и т.д. [48]	Криолитогенный эффект замедленного разрушения за счет вариации температурных полей
в) эпигенетическая (деформации, блоки)	$\alpha$ - $\beta$ -Модификационные переходы кварца с изменением объема и деформациями [69]	Гравитационно-сейсмические напряжения
Неоднородность смесей и включений, по Н.В. Петровской [113]		Наличие энергетически различных горизонтов и зон в земной коре [6]

Итак, еще на эндогенной стадии формирования рудного вещества в каждой элементарной ячейке его объема возникает колоссальное количество неоднородностей, имеющих преимущественно структурную, т.е. физическую, природу. Число разнообразных прочностных дефектов, а также дислокаций в кристаллах столь велико, что плотность их достигает  $10^4$ - $10^6$  на  $1 \text{ см}^2$  [191], а в сильно деформированных кристаллах еще больше - до  $10^{10}$ - $10^{12}$  на  $1 \text{ см}^2$  [87]. Даже столь совершенный материал, как металл, содержит после холодного деформирования около 1 млн. различных дислокаций в  $1 \text{ см}^3$ .

Кроме отмеченных причин возникновения неоднородностей в рудном веществе, многие исследователи указывают на целый ряд явлений, которые накладываются на рудные тела и горные породы в пострудную стадию и приводят к образованию как структурных неоднородностей, так и неоднородностей в распределении напряжений в объеме рудного тела, т.е. неоднородностей силовых полей. Часть силовых неоднородностей фиксируется в рудном материале в неясном, скрытом состоянии и обнаруживается лишь в процессах гипергенеза, увеличивая проницаемость рудной системы и скорость ее физического разрушения. Другая часть напряжений еще до выведения рудного тела в зону гипергенеза увеличивает его проницаемость за счет роста трещин, их ветвления и т.д.

Физические особенности состояния рудных тел в зоне гипергенеза можно разделить на три группы (табл. 7); две первые группы имеют преимущественно эндогенную природу, а третья связана с тектоно-геоморфологическими явлениями, которые оказывают воздействие на рудное вещество также еще до выведения рудных тел в зону идиогипергенеза. Итак, мы можем констатировать, что, помимо химического и минералогического состава рудного вещества, важным фактором является его внутреннее состояние, характеризующееся энергией состояния и неоднородностью строения. Именно зоны этих неоднородностей и границы их взаимопереходов с физической точки зрения наиболее уязвимы, так как представляют собой наиболее ослабленные участки, первыми реагирующие на изменения энергетического состояния физико-химической системы. Следовательно, уже в первые моменты формирования рудного тела в нем закладывается своеобразный генетический код в виде различных неоднородностей, который в термодинамических условиях зоны гипергенеза, резко отличных от эндогенных, приводит сначала к физическому, а затем и к химическому распаду рудной системы. Нельзя не вспомнить в этой связи слова А.А. Саукова о том, что "момент рождения минералов является, таким образом, и началом их смерти" [139, с. 270].

Чтобы проанализировать процесс разрушения рудного вещества в собственно зоне гипергенеза, необходимо коснуться некоторых понятий теории прочности и разрушения материалов.

### Элементы теории прочности и физики разрушения

Элементарные понятия по теории прочности введены в геологию месторождений полезных ископаемых В.М. Крейтером [67]. К настоящему времени значительно расширились и углубились знания о физической сущности твердости, прочности, о строении кристаллических решеток и закономерностях, присущих процессам разрушения [87, 102, 131, 175 и др.]. Это позволяет сделать некоторые дополнительные замечания.

Характерной особенностью рудного вещества и большинства россыпеобразующих минералов (кроме самородных) является их поведение как хрупких материалов. Хрупким разрушением, по Ф. Макклин-току и Д. Аргону [87], называется внезапное разделение напряжен-

ного тела на две или более части без какой-либо поддающейся изменению неупругой деформации. Эти авторы отмечают, что данный вид разрушения сопровождается минимальным поглощением энергии и при определенных условиях становится самоподдерживающимся.

Согласно классической теории Гриффитса, если в некотором элементарном объеме хрупкого материала имеется трещина, то в случае приложения напряжений она может увеличиться в длину на некоторый элементарный отрезок, в результате чего образуются две новые поверхности. При этом в зоне приращения трещинки произойдет снятие существовавших там напряжений. Энергия напряжения перейдет частично в тепловую энергию, а частично пойдет на образование приращиваемой новой поверхности. Гриффитсом установлено также, что напряжение  $P_c$ , при достижении которого трещина начинает быстро расти в длину и приводит к разрушению образца, связано определенным образом с длиной начальной (зародышевой) трещины ( $c$ ), с поверхностной энергией ( $\sigma$ ) и модулем упругости  $E$  данного материала:

$$P_c \approx \sqrt{E\sigma/c}. \quad (1)$$

Благодаря концентрации напряжений в зоне растущей трещины может развиваться напряжение в 600 раз большее, чем среднее напряжение в образце [12]. Таким образом, "трещина в кристалле оказывается инструментом, с помощью которого приложенная извне слабая сила рвет поочередно одну за другой прочнейшие межатомные связи" [34, с. 75].

В настоящее время признано, что теория Гриффитса не противоречит реальным условиям разрушения рудных тел. В частности, для геологических целей необходимо процесс разрушения руд и горных пород также связывать с энергией, затраченной на разрушение. Аналогичным образом поступают в физике горных пород, когда исходят из представления, что "вся энергия разрушения, за вычетом потерь на неизбежный нагрев и другие виды рассеивания, идет на образование новых поверхностей тела - на увеличение свободной поверхностной энергии породы" [132, с. 46]. При этом полезная работа разрушения  $W$  может быть подсчитана по формуле

$$W = \Delta S W_0, \quad (2)$$

где  $\Delta S$  - площадь вновь образовавшейся поверхности;  $W_0$  - удельная поверхностная энергия.

Вытекающий из выражения (2) вывод о том, что дисперсность продуктов физического разрушения (например, при выветривании) определяется величиной  $\Delta S$  и зависит от приложенной разрушающей энергии, имеет важное литогенетическое значение, в частности, для оценки эффективности физических и химических факторов деструкции руд и горных пород при россыпеобразовании.

В последние годы в физике твердого тела и в подходах к проблеме прочности наметилось новое направление исследований, основанное на атомно-кинетических представлениях о тепловом движении ионов вещества [131]. Считается, что внешние силы, прилагаемые к твер-

дому телу, не осуществляют разрыва межатомных связей, а лишь создают условия для их необратимого разрыва тепловыми флуктуациями.

Доказано, что прочность, т.е. величина разрывной нагрузки, непосредственно связана с временем разрыва, а зависимость долговечности образцов  $\tau$  от приложенного напряжения  $\sigma$  имеет вид

$$\tau = A e^{-a\sigma}, \quad (3)$$

где  $A$  и  $a$  — константы данного материала при данной температуре. Зависимость  $\tau$  от  $\sigma$  означает, что для разрыва в той или иной зоне образца необходимо время, в течение которого в теле, находящемся под действием, например, растягивающей нагрузки, протекают какие-то процессы, приводящие к его распаду на части.

В.Р. Регель и А.И. Слудкер пришли к выводу, что тепловая энергия влияет на разрушение тел не в виде среднего и сравнительно слабого теплового фона, а именно в виде тепловых всплеск-флуктуаций. Энергия тепловых флуктуаций тратится на рассоединение атомов в нагруженных твердых телах, что и составляет сущность процесса разрушения.

В свете атомно-кинетической концепции становится ясно, что разрушение геологических пород или руд развивается с момента приложения к твердому телу внешней нагрузки, вызывающей напряжение межатомных связей. За счет гетерогенности строения и анизотропности вещества пород или руд внешняя нагрузка распределяется неравномерно по связям: возникают локальные перенапряжения и в наиболее слабых точках связь оказывается относительно наиболее перенапряженной. Именно в этих местах наиболее интенсивно идут процессы термофлуктуационного разрыва напряженных связей, формируются очаги разрушения, развитие которых и заканчивается распадом тела на части.

В целом представления кинетической теории разрушения важны для геологических приложений в нескольких отношениях. Во-первых, становится ясно, что первичные разнообразные неоднородности в веществе рудных тел и пород являются главной причиной их разрушения в зоне выветривания, а распределение этих неоднородностей задает общую схему разрушения и распределения продуктов физического выветривания. Понятными становятся, во-вторых, и факты замедленного разрушения, когда в напряженных телах происходит постоянная разрушительная работа вследствие поочередного разрыва атомно-ионных связей тепловыми флуктуациями. Особенно интересны, в-третьих, представления о том, что циклическое и статическое разрушение принципиально тождественны. Хотя разрушение тел под действием статической нагрузки ("статическую усталость") обычно не сравнивают с природой динамической или циклической усталости, однако такое сопоставление вполне правомерно, если рассматривать разрушение как процесс [131]. Отмеченное обстоятельство имеет исключительно широкую область применения для интерпретации закономерностей геологических процессов, имеющих очень часто циклический и дискретный механизм развития.

Физическая картина разрушения весьма детально рассмотрена также В.М. Финкелем [175] на основе обширного экспериментального материала. Доказано, что на субмикроскопическом уровне существует множество механизмов разрушения (слияния дислокаций, зарождения микротрещин на краях субграницы, на поверхностях раздела, при взаимодействии двойников, вскрытии полостей и т.д.). Кинетика разрушения характеризуется несколькими стадиями. В первую стадию происходит возникновение микротрещин и некоторое их субкритическое развитие. Ширина микротрещин при этом может достигать 100–500 и даже 900 Å. Основным элементом этой первой стадии, также докритической, является так называемое подрастание микротрещин. В процессе развития (подрастания) микротрещин происходит их объединение, в результате которого формируется русло уже более крупной трещины. При своем формировании русло трещины огибает крупные зерна, поглощает малые, создавая линейную зону нарушений сплошности в теле. При этом в различных материалах докритическое подрастание трещин происходит с учетом внутренних структурных особенностей вещества. Например, в кристаллах минералов (алмаз, сапфир и др.) трещины зарождаются в большинстве случаев с поверхности и растут в глубь кристалла. Существенно влияют на зарождение трещин в кристаллах искажения и дефекты на их гранях. Однако, несмотря на индивидуальные особенности роста трещин в различных материалах, общие закономерности принципиально сходны. Характерная черта роста трещин – дискретность, скачкообразное развитие. В геологических условиях оно может быть стимулировано температурными колебаниями (флюктуациями) или фазовыми превращениями воды при переходе через 0°C. Дискретность развития трещин связана с тем, что кинетика роста трещин включает фазу ветвления и появления отходящих от магистральной вторичных трещин, замедляющих скорость распространения основной трещины. После каждого акта ветвления скорость распространения трещины падает, вплоть до полной остановки ее роста. По-видимому, это связано с тем, что в момент ветвления происходит снятие напряжения в наиболее нагруженной зоне и необходимо какое-то дополнительное время для накопления напряжения или появления новой флюктуации для возобновления процесса трещинообразования. После краткой фазы покоя начинается возрастание скорости продвижения трещины, завершающееся очередным ветвлением, и т.д.

Сущность перехода ко второй (критической) стадии разрушения заключается в том, что к определенному моменту тело оказывается насыщенным критическим количеством микроскопических зародышей разрушения. Киносъемка показывает на последней стадии разрушения объединение концов микротрещин, лавинообразное ветвление трещин по схеме автокаталитических цепных реакций [175], которое и приводит к окончательной дезинтеграции хрупкого тела на обломки различной крупности. Эксперименты, выполненные разными исследователями, показывают, что в последний момент перед разрушением рост трещин также замедляется. Вероятно, требуется некоторый дополнительный энергетический импульс в виде тепловой или иной флюк-

туации для окончательного разрыва перенапряженных межатомных связей в хрупком материале. Последний факт интересен в том отношении, что в горных породах и кристаллах бывают состояния, когда вещество насыщено системами микротрещин, но объединение их в силу каких-то причин еще не завершилось. В этом случае достаточно небольшого внешнего воздействия, чтобы слияние микротрещин катастрофически быстро завершилось и тело оказалось полностью распавшимся на части (например, ударное взаимодействие в потоке, при гравитационном обрушении и т.п.). Следует заметить, что данные В.М. Финкеля, Дж.Ф. Нотта и других исследователей также подтверждают отсутствие принципиальных различий между статическим и динамическим разрушением, причем "картина ветвления (трещин. — Ю.Ш.) более богата именно в статическом случае" [175, с. 160].

Итак, современные представления теории разрушения открывают совершенно новую сферу явлений и нерешенных задач перед геологом, имеющим цель выяснить, что же происходит с рудным веществом после того, как, однажды возникнув в недрах Земли, оно постепенно выводится к дневной поверхности, заканчивая свою жизнь полным распадом на частицы разной крупности. Несомненно, что факторы, действующие в природной обстановке, сложнее условий экспериментального разрушения и сделанных на этой основе теоретических обобщений. Но физическая природа явлений и механизмов едина во всех случаях, и это дает методологическую основу для рассмотрения механизмов распада руд и высвобождения минералов в процессах выветривания и формирования россыпных концентраций. После того как были рассмотрены химический и минералогический составы интересующих нас объектов исследования — россыпеобразующих формаций, кратко освещены аспекты энергетики литогенетических процессов, а также особенности состояния рудного вещества и закономерности разрушения в теоретическом плане, необходимо рассмотреть те факторы, действию которых подвержено вещество руд и пород непосредственно в обстановке выветривания.

### Экзогенные факторы выветривания

Если факторы физического состояния руд и горных пород по сути своей никак не связаны с физико-географическими условиями, т.е. аazonальны, то экзогенные факторы выветривания полностью контролируются параметрами физико-географической среды, которые на нашей планете распределены зонально. Однако элемент зональности проявляется лишь в уровне приходящей энергии, структура же экзогенных факторов едина для любого варианта физико-географической среды. Основные экзогенные факторы сводятся к следующему (табл. 8).

Термодислокации в горных породах и рудах возникают при температурных колебаниях вследствие анизотропности минералов и неодновременности изменения наружных и внутренних слоев образцов. А. Пенк отмечал, что при амплитуде изменения температуры

Таблица 8

Экзогенные факторы физико-химического выветривания

Физические	Химические	Биогенные
Термодислокации	Термокинез	Биокоррозия
Фазовые превращения вода - лед (криодеструкция)	Ультрафиолетовое облучение	Биокинез
Гидростатические напряжения	Количество влаги	Эффект влагозадержания
Гидравлические напряжения	Криокинез	Транспирация
Эффект Ребиндера	Механокинез (гидроэрозия)	Эффект затенения
Гравитационно-ударные		Биоэнергетический фактор
Эффект замедленного разрушения		

70° (что вполне обычно для Земли) на 1 м<sup>2</sup> горной породы наблюдается приращение площади 1400 мм<sup>2</sup>. Разрушающее воздействие термодислокаций связано с тем, что при тепловом расширении и сжатии поликристаллической системы далеко не все кристаллы и зерна занимают свои прежние места и при многократных изменениях температуры поликристаллическая система расшатывает себя изнутри [163]. Ю.Г. Симонов [145] относит термодислокации, как фактор выветривания, к разряду второстепенных. Журно и Кутард [229] провели опыты по термодеструкции пород в течение 40 тыс. термошоков.

Установлено, что после 25 тыс. термошоков (с перепадом температур 60°) из 20 опытных образцов 5 раскололись и 8 растрескались. Авторы отмечают, что с увеличением числа термошоков нарастает усталость породы, в целом же термодеструкция (термокластия по терминологии авторов) происходит менее интенсивно, чем криодеструкция.

Криодеструкция вследствие фазовых превращений воды при переходе через 0°С оказывается весьма интенсивным фактором выветривания. Разрушение развивается за счет возникающих при замерзании воды гляцио- и гидростатических напряжений во всем объеме рудного вещества или горной породы. Разрушающее действие фазовых переходов воды зависит от их частоты в течение года. Для условий Земли Франца-Иосифа число таких переходов равно 100 [164]. Для широты Магадана число переходов через 0°С может достигать 180 (среднее многолетнее), а годовой ход температуры для различных глубин и склонов разной экспозиции характеризуется однократным переходом через 0°С (рис. 15). В таежном Приангарье особенно частой сменой температур ( $\pm T^{\circ}\text{C}$ ) отличается весенний период (до 43 раз) с максимальной амплитудой 27,7°.

Количественных данных о скорости криогенной деструкции имеется немного. Интересный эксперимент выполнил А. Хильгер (рис. 16) еще в 1897 г. [50], В.Л. Суходровский [164], ссылаясь на опыты Гесса, отмечает, что в течение года при 300-кратном переходе

Рис. 15. Годовой ход температуры на глубине деятельного слоя южной (1) и северной (2) экспозиции (по данным Т.В. Мельниковой)

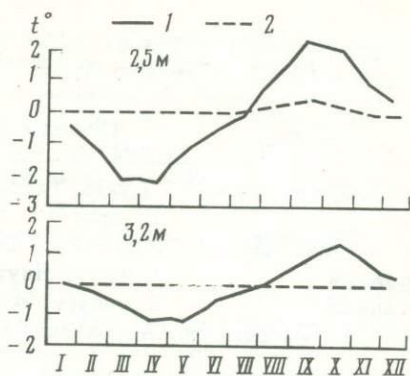


Рис. 16. Графики продуцирования грубодисперсного (А) и мелкого (Б) материала в опытах Хильгера по выветриванию [50]

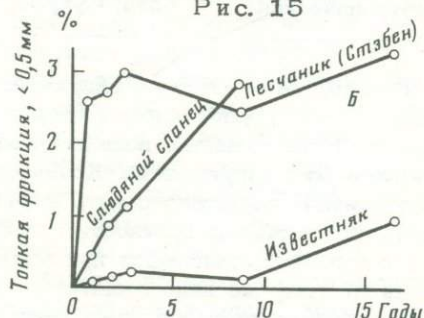
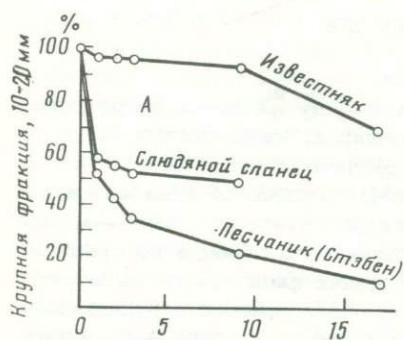


Рис. 16

температуры гранитной стены через  $0^{\circ}\text{C}$  на опытной площадке в Альпах образовалось 5 т мелкозема, что равно скорости отступления поверхности отвесной стены 0,19 мм в год. Аналогичные наблюдения были выполнены М.И. Ивероновой на Тянь-Шане, получившей скорость отступления поверхности 0,17 мм в год [164]. Лабораторные опыты выявили скорость образования частиц мельче 1 мм, составляющую 0,396% (от исходного веса шtuффов) за 100 циклов перехода температур через  $0^{\circ}\text{C}$ .

Интересно отметить, что криогенное выветривание свойственно не только высокоширотным районам (табл. 9). Кроме того, характеризуя криогенное выветривание, надо иметь в виду, что максимальное усилие замерзшей воды, равное  $2050 \text{ кг/см}^2$ , достигается при температуре  $-22^{\circ}\text{C}$ . Не во всех климатических зонах и далеко не каждый переход через  $0^{\circ}\text{C}$  сопровождается понижением температуры до максимального разрушающего уровня. Если же прочность пород превышает максимально развиваемое давление замерзающей водой, то процесс криодеструкции также будет менее интенсивен. Поэтому мнение о том, что в природной обстановке скорости выветривания горных пород в сотни раз больше показателей выветривания, полученных при опытах [22], представляется недостаточно обоснованным. Результаты лабораторных и натуральных экспериментов отражают интенсивность процесса выветривания.

Таблица 9

Среднее число переходов через 0°C в различных климатических зонах [185] в течение года

Зона	Станции наблюдений	Число ( $\pm T^{\circ}, C$ )
Арктических пустынь	Бухта Тихая, Мыс Челюскин	75
Субарктическая	Мурманск, Салехард, Тикси	53
Таежная	Сургут, Якутск	66
Степная	Оренбург, Кокчетав	62
Пустынь умеренного пояса	Астрахань, Ургенч, Или	79
Субтропическая	Ялта, Сухуми, Ленкорань	33

Гидростатические напряжения в замкнутых полостях рудного вещества или горной породы (порах, трещинах, межзерновых пространствах), несомненно, возникают при различных статических или динамических напряжениях. Количественные данные об этих явлениях отсутствуют, но можно судить о роли гидростатических факторов косвенно, по снижению прочности влагонасыщенного образца по сравнению с сухим, выявившейся при моделировании физического выветривания. К тому же надо отметить, что если напряжение в рудном материале носит характер всестороннего сжатия, то в зоне напряжения происходит упрочение материала. Прочность кварца может достигать, например, 25 200 кг/см<sup>2</sup> [12]. В этих условиях внутренние гидростатические напряжения не оказывают на рудное вещество разрушающего воздействия.

Гидравлические напряжения как фактор разрушения материала, проявляющиеся в виде упругих свойств гидратных пленок [190], еще менее исследованы, чем гидростатические напряжения. С другой стороны, известны факты разрушения образцов в водной среде после снятия нагрузки. При этом обнаруживались признаки разрыва материала на растяжение, хотя соответствующие нагрузки отсутствовали. Оказалось, что вода способна растворяться в поверхностном слое, например стекла, глубиной до 200 молекулярных слоев. Разрушение после снятия давления в сильной степени зависело от скорости снятия давления: не происходило при медленном снятии давления и появлялось при быстром. "Похоже было, - отмечает П. Бриджмен [12, с. 200], - что воде, которую давление вогнало в стекло, требовалось время для того чтобы выйти наружу при снятии давления; если вода не успевала выйти, то она расширялась на месте при снятии давления и вызывала разрушение стекла".

Эффект Ребиндера как фактор разрушения хорошо известен в технике и технологии [35]. Он проявляется в виде воздействия адсорбционных пленок на поверхности материалов и приводит к резкому снижению их прочности. Роль этого фактора в разрушении твердых тел признается и другими исследователями [102].

Гравитационно-ударные факторы далеко не всеми исследователями относятся к числу основных агентов выветривания и разрушения руд в зоне гипергенеза. Между тем эти факторы настолько интенсивно проявлены при движении материала по склону, при обрушениях, обвалах и переносе водным потоком, что по уровню энергозатрат и продуцированию дисперсного материала не только вполне сопоставимы с остальными факторами выветривания, но во многих случаях значительно их превосходят, приобретая ведущее значение в разрушении рудного материала и высвобождении россыпеобразующих минералов.

Замедленное разрушение руд или горных пород проявляется в условиях длительного напряженного состояния и особенно интенсивно происходит, если при этом тело испытывает воздействие переменных тепловых полей, электромагнитных, гравитационных и т.д. В моменты импульсов в состоянии того или иного поля в нагруженных горных породах возникают флуктуации в поведении атомов, заканчивающиеся разрывом межатомных связей и трещинообразованием. В экспериментах П. Бриджмена наблюдалось полное разрушение образцов кварца, шпинели, сапфира и алмаза с превращением в тонкий порошок без следов пластической деформации. При анализе выветривания следует принимать во внимание явления спонтанного появления трещин и разрушения материала через некоторое время после снятия давлений. В опытах со стеклом пирекс и с монокристаллами кварца, турмалина, кальцита, полевых шпатов наблюдалось самопроизвольное появление трещин через период времени от 3 до 25 лет после снятия давления [12]. В геологии также известны факты самопроизвольного распада на дневной поверхности монокристаллических горных пород, находившихся перед этим в напряженном состоянии. Сходный механизм имеет выкрашивание стенок горных выработок после их проходки.

Рассмотренные физические факторы наиболее просты по механизму своего проявления. Следующая группа факторов выветривания, химических, более сложна по механизмам своего проявления.

Термокинез в нашем понимании (см. табл. 8) — это ускорение химического выветривания под воздействием тепловой энергии, т.е. температуры окружающей среды. В.М. Сеницын отмечает, например, что в современных латеритных районах деятельный слой почвы, в котором совершаются все самые энергоемкие реакции выветривания, прогревается до 35°C в условиях высокой влажности и до 45°C в сухой (бездождный) период [146]. При интерпретации явлений термокинеза в литогенетических процессах большое значение придают правилу Вант-Гоффа [159, 146]. Выше уже отмечалось, что эта химическая закономерность требует внимательного изучения в отношении ее применимости к физико-химическим условиям литогенеза и россыпеобразования. Как известно, правило Вант-Гоффа установлено для гомогенных систем и для строго заданных условий в отношении концентрации реагирующих веществ. Гораздо сложнее проходят реакции в гетерогенных системах, состоящих из нескольких частей, различающихся по своим физическим или химичес-

ким свойствам и отделенных друг от друга поверхностями раздела. В гетерогенной системе реакция всегда происходит на поверхности раздела двух фаз, так как только здесь молекулы разных фаз сталкиваются одна с другой. Скорости сложных реакций связаны также с тем, что такие реакции протекают обычно через промежуточные стадии и общая скорость такого процесса определяется скоростью наиболее медленной реакции. Проведенные нами опыты подтвердили, что термокинез развивается по более сложным законам, однако в целом совершенно бесспорно значение притока тепловой энергии к выветривающейся физико-химической системе — рудному телу как мощному регулятору этого процесса.

Ультрафиолетовое облучение в качестве фактора главным образом химического выветривания в теории континентального литогенеза практически не изучено. Наши опыты, поставленные на основании данных других исследователей [131], подтвердили, что в условиях физического выветривания УФ-облучение ускоряет выветривание более чем в 20 раз, что позволяет считать этот фактор активным регулятором скорости выветривания.

Количество влаги — один из главных факторов выветривания, его значение подчеркивал Н.М. Страхов. При этом он считал влияние количества влаги на кинетику химического выветривания, а также приток тепла априорно заданными самой природой и не анализировал механизм воздействия этих факторов на конкретные химические превращения вещества в зоне гипергенеза (кроме ошибочных ссылок на правило Вант-Гоффа). Анализируя представления современной химии, а также полагаясь на экспериментальные данные Ж. Педро [111] и наши собственные, мы пришли к выводу, что количество влаги не вносит видимых качественных изменений в направленность выветривания, регулируя лишь масштабы развития того или иного процесса. Поэтому в экспериментах по выветриванию нами учитывалась лишь величина инфильтрации влаги в поверхностный слой выветривающегося материала. При этом подразумевалось, что геологическая работа, производимая дождевыми каплями вследствие их кинетической и тепловой энергии, косвенно также связана с общим количеством осадков в любой данной точке поверхности.

Криокинез — это эффект экстрагирования химических элементов и переход их в раствор при воздействии низких температур, а также в результате фазовых превращений воды. На этот эффект и его геологическое значение обращали внимание многие исследователи, поэтому в проводимых экспериментах он также был исследован.

Механокинез, т.е. ускорение химических превращений под влиянием механических взаимодействий, хорошо известен из области техники. Явления механокинеза отмечались нами при моделировании переноса материала в водном потоке. При трении обломков между собой возникают сложные электростатические взаимодействия между частицами, приводящие к ускорению химических процессов (растворению, окислению, диссоциации воды и т.п.). В этих условиях интенсивно растворялось самородное золото [108]. Однако следует заметить, что электрокинетические и другие химические явления в

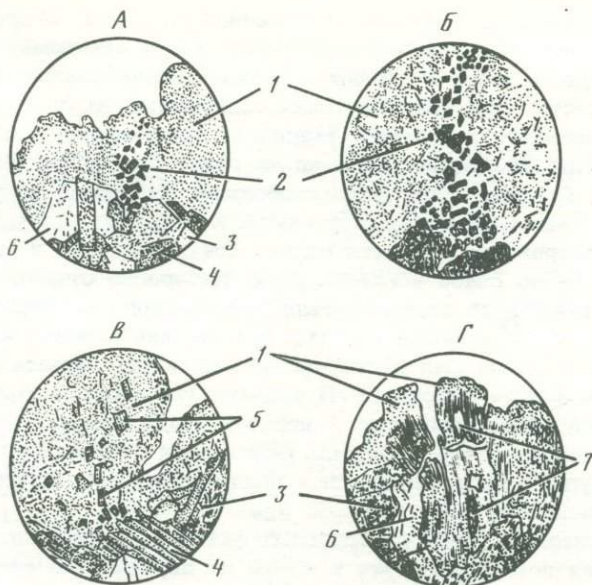


Рис. 17. Биомеханическая деструкция горных пород лишайником [110]

*A, B* – разрушение магнетита и вовлечение его в тело лишайника; *B* – разьединение по граням спайности кристалликов роговой обманки и втягивание их в тело лишайника; *Г* – расщепление гифами хлорита по спайности. Кварцевые зерна остаются неизменными

1 – тело лишайника; 2 – магнетит; 3 – серицитизированный плагиоклаз; 4 – роговая обманка; 5 – обломки роговой обманки; 6 – кварц; 7 – хлорит

движущихся средах, особенно в приложении этих явлений к объяснению геологических процессов, еще ждут своего исследования.

Третьей большой группой факторов являются биогенные факторы (см. табл. 8). Роль их в выветривании общеизвестна, однако в приложении к проблемам россыпеобразования она практически не исследована, поэтому мы вынуждены ограничиться изложением некоторых общих данных. Явления биокоррозии и биодинамические эффекты отмечались В. Пенком и исследовались рядом ученых с позиций почвоведения [110, 119]. Отмечено, что в высокоширотных и горных районах весьма значительное участие в физическом, а посредством этого и в химическом выветривании принимают низшие растения и организмы (рис. 17). Минококки и минобактерии активно способствуют подводному выветриванию [43]. Явление биокинеза хотя и выделено нами отдельно (см. табл. 8), однако проявляется в сложном сочетании с остальными биогенными факторами, причем иногда эти факторы тормозят выветривание. Например, эффект дополнительного влагозадержания, создаваемый растительностью, оказывается значительно ослабленным в результате затенения поверхности

и уменьшения доли поступающей солнечной радиации. С другой стороны, растительность значительную часть влаги впитывает, препятствуя инфильтрации воды в породы и осадки склона или водораздельной поверхности. При этом растения отсасывают на себя свободные ионы из почвенного горизонта, выводя их из реакционноспособного состояния. При отмирании растений на окисление органической массы расходуется большое количество свободного кислорода почвы и дождевых вод. Таким образом, не исключено, что роль биомассы как фактора выветривания является сильно преувеличенной и уж во всяком случае очень слабо исследованной. Интересно отметить в этой связи, что некоторые исследователи тропического выветривания [227] приходят к заключению, что тропические деревья живут "из дождя", т.е. в очень малой степени ассимилируют минеральные компоненты почвенного субстрата. В тропических лесах формируется своеобразный деятельный слой в несколько дециметров мощностью, в котором локализованы процессы разложения листового опада, питающего крупную растительность и предохраняющего коренные породы от интенсивного выветривания.

Итак, приведенный обзор основных факторов физико-химического выветривания показывает, что в целом их перечень не слишком велик. Правда, в зоне гипергенеза эти факторы находятся в сложном взаимодействии, однако многолетний опыт, накопленный в почвоведении и физической географии, всегда позволяет безошибочно выделить главный элемент физической или химической деструкции горных пород. Постоянное присутствие того или иного ведущего фактора и обусловливаемого им процесса открывает возможность экспериментального изучения условий и механизмов выветривания.

#### ФИЗИЧЕСКОЕ ВЫВЕТРИВАНИЕ РУД И ГОРНЫХ ПОРОД

Физическое выветривание руд и горных пород изучалось нами на примере элювиальных горизонтов ряда районов восточной части СССР, в пределах рудных полей, относящихся к различным россыпепеобразующим формациям, а также с помощью лабораторных экспериментов. Методика полевых исследований состояла в отборе проб объемом  $0,01 \text{ м}^3$  из элювия с последующим их комплексным изучением в отношении фракционного и вещественного состава, морфологии обломочного материала, литологических особенностей элювия и т.п.

Характеристика процессов физического выветривания дана здесь преимущественно на примере Северо-Востока СССР и Дальнего Востока, в пределах территории, прилегающей к зоне влияния Тихоокеанского рудного пояса. В физико-географическом отношении эта зона характеризуется зональностью климатических параметров (табл. 10), что дает возможность сопоставить особенности современных литогенетических процессов с энергетическим воздействием внешней среды.

Методологические аспекты нашего подхода к анализу связи физического выветривания и континентального литогенеза в целом из-

Таблица 10

Основные параметры климата в зоне Тихоокеанского рудного пояса (в секторе между 120 и 140° восточной долготы)\*

Широта, град	Суммарная солнечная радиация, ккал/см <sup>2</sup>	Радиационный баланс, ккал/см <sup>2</sup>	Среднегодовая температура воздуха, °С	Годовая амплитуда температуры воздуха, °С	Продолжительность безморозного периода, дни	Количество осадков, мм
90	Менее	Менее	-23		Менее	
80	60	10	-15	28	60	100
70	-	-	-11	-	-	-
60	80	20	-2	53	60	250
50	-	-	+7	-	-	-
40	120	80	+15	34	150	500
30	-	-	+23	-	-	-
20	140	100	+27	4	270	2000
10	-	-	+28	-	-	-
0	120	100	+28	2	-	2000
10	-	-	+27	-	-	-
20	180	70	+25	14	-	500
30	-	-	+18	-	-	-
40	100	60	+13	4	-	1000
50	-	-	+5	-	-	-
60	60	20	-17	8	-	500
70	-	-	-15	-	-	-
80	-	-	-26	36	-	100
90	-	-	-35	-	-	-

\* По данным [173]; прочерк означает отсутствие достоверных данных.

ложены ранее [206, 216]. Такой подход включает выбор географо-геологических эталонов, расположенных в разных по широте пунктах, и детальное изучение в пределах этих опорных участков комплекса современных осадков и процессов их формирования. Известно, что сочетание продуктов выветривания характеризует спектр действующих процессов разрушения руд или горных пород [145]. Анализируя распределение продуктов выветривания в пунктах на различной широте, мы можем оценить энергетический вклад различных факторов выветривания в разрушение рудного вещества или горной породы и высвобождение при этом россыпеобразующих минералов. Количественной характеристикой возникающих при выветривании спектров может служить скорость превращения за единицу времени заданного объема монолитной рудной массы в гранулированный (дисперсный) материал с некоторым заданным размером обломков.

Установленный характер зависимости между гранулометрическим спектром элювия и высвобождением ценных компонентов [208] позволяет данные, полученные при литогенетическом анализе процесса элювиеобразования, использовать для суждения о степени высвобождения интересующих нас минералов. Наиболее простым типом элювия, обладающим элементарным гранулометрическим спектром

(ЭГС), является элювий высокоширотных или высокогорных районов, называемый Е.В. Шанцером [190] криогенным элювием. Такой тип элювия отличается резким преобладанием щебневых и более крупных фракций при пониженном содержании материала псаммитовой и пелитовой размерности.

Формирование ЭГС непосредственно связано с интенсивностью энергетического воздействия на разрушающийся материал. Высокоширотные районы характеризуются пониженной солнечной радиацией, значительной амплитудой колебаний температуры в течение года, отрицательной среднегодовой температурой (см. табл. 10). Следовательно, приход энергии, которая могла бы здесь быть затрачена на разрушение руд и горных пород, сравнительно невысок. Но низкий энергетический уровень зоны гипергенеза в высоких широтах компенсируется более эффективным использованием энергии благодаря ее дискретному поступлению, создающему циклические импульсы напряжения в материале руд и горных пород. Однако известно, что эти импульсы в состоянии измельчать материал до определенной крупности [206, 64]. По мере измельчения материала скорость продуцирования все более тонких фракций уменьшается. Это связано с кинетикой измельчения, а также с тем, что в диспергируемом материале оказываются израсходованными наиболее дефектные и ослабленные зоны, в которых циклические температурные и гляциодислокационные напряжения достигли разрушающих значений. Происходит своеобразная селекция все более устойчивых к агентам физической деструкции частиц кристаллического вещества руд и горных пород. Следовательно, для дальнейшего измельчения требуется дополнительный приход энергии, и в частности такой энергии, которая могла бы оказывать деструктивное воздействие на кристаллохимическую структуру минеральных частиц. Если такое дополнительное поступление энергии происходит, то материал должен достигать все большей степени измельчения.

Высказанное положение прекрасно согласуется с наблюдаемыми в природе соотношениями водораздельных, склоновых и пойменных отложений. В энергетическом отношении любой объем рудного материала, находящийся на водораздельной поверхности (рис. 18), испытывает минимальное энергетическое воздействие внешней среды. Если этот материал оказывается на склоне, то содержащаяся в нем потенциальная энергия переходит в кинетическую и способна оказывать разрушающее воздействие на структуру вещества. При этом продолжает действовать и энергия внешней среды, к тому же время ее воздействия постоянно нарастает. При попадании рудного материала в русло водотока количество энергетических факторов и продолжительность их воздействия оказываются максимальными и соответственно максимальной оказывается диспергированность материала.

Идея энергетической обусловленности степени измельчения материала вполне подтверждается при прослеживании гранулометрического спектра элювия и делювия в широтном направлении, с севера на юг. При этом наблюдается постепенное нарастание количества песчано-глинистых фракций (табл. 11). В более южные районы, по которым

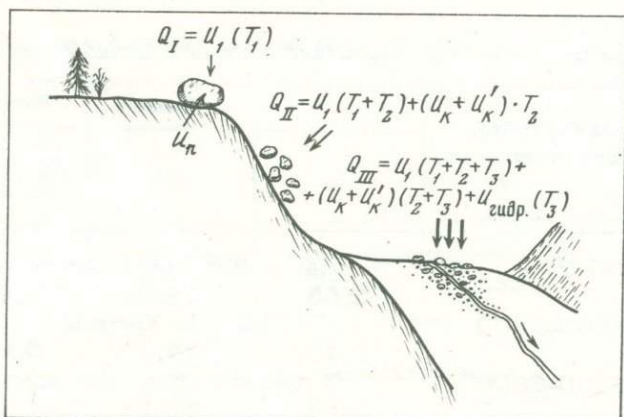


Рис. 18. Упрощенная схема различного энергетического воздействия на единичную массу в зависимости от ее положения на водоразделе, склоне или в русле

$U_n$  — потенциальная энергия единичного тела, переходящая в кинетическую при движении по склону или в русле;  $Q_I$  — минимальный уровень энергетического воздействия, определяемый внешней энергией  $U_1$  и временем  $T_1$ ;  $Q_{II}$  — суммарное энергетическое воздействие на ту же первичную массу рудного материала на склоне, зависящее от продолжительности  $(T_1 + T_2)$  воздействия энергии внешней среды и дополнительной кинетической  $(U_K)$  энергии самого обломка и вмещающего материала  $(U'_K)$ ;  $Q_{III}$  — суммарное энергетическое воздействие в русле, возрастающее за счет времени  $(T_1 + T_2 + T_3)$  и дополнительной кинетической энергии потока  $(U_{гидр})$

отсутствовали полевые наблюдения, намечающаяся зависимость хорошо экстраполируется при анализе различных данных, опубликованных в литературе по почвоведению, гидрологических материалов и т.д. Ранее нами отмечалось сокращение с севера на юг количества крупных фракций во взвесах рек при одновременном увеличении глинистой составляющей [206] и минерализации речных вод [216].

Значительные отличия появляются в элювии, формирующемся в непосредственной близости от рудных тел и в пределах рудных полей тех месторождений, в которых отчетливо выражена сульфидизация. Здесь заметно снижается количество глыбового материала, резко возрастает доля дресвы и пелитового материала (до 2-5 раз). Вследствие этого ухудшается сортированность элювиальных образований в пределах рудных полей, иногда увеличивается мощность элювия и он приобретает черты коры выветривания криогенного типа. Полевые наблюдения и лабораторное изучение руд и вмещающих пород показывают, что эти особенности элювия рудных полей обусловлены более высокой проницаемостью зон минерализации, гетерогенностью вещественного состава руд и горных пород, а также наложением химических процессов, обуславливаемых присутствием малоустойчивых минералов.

Таблица 11

Гранулометрические характеристики элювия и делювия различных

Географическая широта, град; расстояние от эква- тора, км	Элювий		
	$S_0$	$Md$	Фракция < 2 мм, %
68-70; 7800	Побережье Восточно-Сибирского моря 1,58	14,08	7,48
65-67; 7200-7500	Бассейн Колымы 2,45	17,40	9,91
59-62; 6500-6800	Побережье Охотского моря 2,54	51,13	12,55
52; 5800	Камчатка 3,02	15,70	16,12
45; 5000	Приморье 3,71	13,22	22,00

\* Для каждого пункта выполнено 15 определений гранулометрического состава в однотипной морфолитогенетической обстановке;  
 $S_0$  - коэффициент сортировки отложений;  $Md$  - медианный размер.

Анализируя результаты полевых наблюдений и изучения элювия высокоширотных и более южных районов в сравнении с ранее полученными данными о соотношении элювиальных осадков и аллювия [214], можно сделать вывод, что главной тенденцией в формировании элювия и склонового материала, а также аллювия является нарастание дисперсности в зависимости от энергетического воздействия среды. В этих условиях высвобождение россыпеобразующих минералов зависит от дисперсности продуктов выветривания, т.е. от интенсивности деструкционного воздействия на физико-химическую систему, какой является вещество рудного тела. Для подтверждения и проверки этих заключений были выполнены лабораторные эксперименты.

#### Лабораторное моделирование физического выветривания

Несмотря на отмечаемую многими исследователями условность разделения процесса выветривания на химический и физический типы, в методическом отношении такое разделение целесообразно, и мы будем его придерживаться. Лабораторное моделирование проводилось, исходя из необходимости наиболее полно воспроизвести охарактеризованные выше основные факторы выветривания на основе положений современной теории прочности и разрушения хрупких тел. Из наиболее типичных месторождений отобраны образцы руд, отвечающие охарактеризованным выше россыпеобразующим формациям. В целях получения достоверных данных большая часть образцов отбиралась в све-

## широотно-климатических зон на востоке СССР\*

Элювий		Делювий		
Фракция < 0,001 мм, %	$S_0$	$Md$	Фракция < 2 мм, %	Фракция < 0,001 мм, %
	Побережье Восточно-Сибирского моря			
0,24	2,19	20,14	13,69	0,14
	Бассейн Колымы			
0,25	7,40	16,01	32,46	1,65
	Побережье Охотского моря			
0,15	4,01	26,22	24,91	0,75
	Камчатка			
0,51	4,32	126,39	31,17	2,23
	Приморье			
1,95	4,75	11,27	38,14	3,02

жем или минимально измененном состоянии из штолен, керн буровых скважин, забоев и т.д. Для сравнения отбирались и образцы, несущие следы гипергенного преобразования. Часть рабочих коллекций предоставлена МГУ (Н.Г. Миронов), ЦНИГРИ (Б.И. Прокопчук), ВИМС (Л.В. Спорыхина).

Всего выполнено несколько серий экспериментов, включавших: моделирование распада руд вследствие фазовых превращений воды при переходах через 0°C; исследование влияния УФ-облучения; разрушение горных пород и руд термическим ударом; разрушение одно-сторонним сжатием сухих и водонасыщенных образцов; физическое разрушение в гидродинамических средах (коррозия, ударно-гидравлические воздействия и т.п.).

В одной из первых серий экспериментов изучена группа образцов, отобранных из горных выработок с глубины 200-300 м от дневной поверхности на месторождениях золото-кварцевой малосульфидной формации. Образцы представляли собой монолитные штUFFы без внешних нарушений структуры. В лаборатории из штUFFов выпиливались кубы с ребром около 7 см (весом приблизительно 800-1000 г), которые затем подвергались полному насыщению водой, а затем периодическому промораживанию и протаиванию. В опытах использовались термокамеры "Нема" (ГДР) и "Синтез" (советского производства). Методика экспериментов близка к испытаниям строительных материалов на морозостойкость (ГОСТ 10060-62). Единицей времени в эксперименте являлся 1 цикл, включающий промора-

живание образцов в течение 4 ч при  $-25\pm 3^{\circ}\text{C}$  и протаивание в течение 2 ч при  $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Для первой группы образцов была достигнута максимальная продолжительность эксперимента - 5 лет, а число циклов превысило 800. Таким образом, параметры лабораторных экспериментов соответствовали природным условиям Северо-Востока СССР к северу от  $60^{\circ}$  с.ш. (см. табл. 10). Если учесть, что средняя многолетняя частота переходов через  $0^{\circ}\text{C}$  на Северо-Востоке равна 57 циклам (табл. 12), то максимальная продолжительность лабораторного выветривания в реальном масштабе времени составит 14 лет. В среднем же опыты заканчивались после 200-300 циклов, поскольку к этому времени достигалась стабильность изменений и развитие процесса можно было экстраполировать. Такое число циклов отвечало 5-6 годам в реальном масштабе времени при условии, что моделируемый рудный материал выветривался на дневной поверхности. При нахождении его на глубине с однократным переходом температур через  $0^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 16) моделируемый интервал времени (в годах) будет равен количеству циклов криогенного выветривания.

Вслед за первой серией опытов были поставлены другие эксперименты, в методику которых вносились коррективы по мере выяснения основных закономерностей процесса физического разрушения руд и пород. В частности, во всех последующих сериях опытов размер образцов был уменьшен с 350 до 25-30 см<sup>3</sup>. Это стало возможным в связи с тем, что общая картина физического распада рудного вещества и его превращения в дисперсное состояние была выяснена в предыдущих опытах.

Основными регистрируемыми характеристиками в экспериментах были изменение массы образцов в ходе выветривания и гранулометрический спектр продуктов физического выветривания. Поскольку распад рудного вещества означает образование новых поверхностей раздела в твердом теле под действием некоторой энергии, которая и расходуется на образование этих поверхностей, то проще всего оценивать степень их дисперсности гранулометрическим составом. При этом учитывалось, что коль скоро гранулометрический состав отражает не только соотношение некоторых геометрических величин зерен дисперсной смеси, но и энергию, затраченную на образование дисперсной системы, то, значит, чем выше дисперсность системы, тем больше энергии (или времени) затрачено на ее образование. В нескольких опытах дополнительно к регистрации физической составляющей проанализирована жидкая фаза продуктов выветривания, представляющая собой водную вытяжку поровых растворов, отжимавшихся при периодическом промерзании и протаивании образцов. Это позволило оценить химическую составляющую криогенного выветривания.

Наиболее общая картина физического выветривания выявляется при внешнем наблюдении за морфологическими особенностями экспериментальных образцов. Механизмы распада рудного вещества проявляются разрушением по тем поверхностям раздела внутри монолита, которые имелись в нем, когда рудное тело находилось еще на глубине 200-300 м. Эти трещины хорошо заметны при декориро-

Таблица 12

Число переходов через 0°С температуры воздуха в различных пунктах Северо-Востока СССР [157]

Метеостанция	Квартал				Среднее многолет- нее
	1	2	3	4	
Красноармейс- кая	1,2	24,7	32,1	9,3	67,3
Илирней	0,2	25,0	25,5	1,9	52,6
Усть-Олой	0,6	25,8	28,5	4,0	58,9
Омолон	0,0	26,6	28,7	4,2	59,5
Анадырь	2,5	28,4	9,9	11,5	52,3
Марково	1,2	24,2	19,5	8,4	53,3
Кедон	0,2	31,8	35,7	4,1	71,8
Сеймчан	0,4	28,7	26,5	7,2	62,8
Сусуман (Бе- релех)	0,0	33,2	32,9	4,8	70,9
Гижига (Кушка)	3,4	28,2	11,5	11,7	54,8
Наяхан	1,7	26,0	10,1	14,2	52,0
Атка	0,0	36,5	31,8	6,6	74,9
Тайгонос	6,4	28,9	3,1	21,9	60,3
Ямск	0,2	31,0	2,4	17,4	51,0
Нагаево	1,2	31,9	3,5	16,0	52,6
Среднее для региона					57,1

вании их черной тушью на плоских гранях опытных образцов до начала эксперимента (рис. 19). В дальнейшем наблюдалось постепенное раскрытие трещин за счет раздвигания их стенок, разрушения и выкрашивания краев трещин и ребер образцов. Рисунок первичных трещин довольно разнообразен, но наиболее типичны параллельно-поперечные системы трещин, тригонально-крестовидные и ветвящиеся (см. рис. 19). Распад образцов на крупные обломки происходит по одной или нескольким наиболее выраженным трещинам (рис. 20), которые можно рассматривать в качестве аналога магистральных трещин. Уже в первых опытах установлено, что темп распада руд и горных пород в условиях физического выветривания в очень сильной степени зависит от количества кварца в рудной массе или горной породе. Это связано с тем, что кварц является одним из наиболее прочных минералов [132].

Нередко высказывается мнение, что физическое выветривание идет как бы в две стадии - крупного дробления и последующего диспергирования крупнообломочного материала на мелкие фракции. В действительности этот процесс развивается одновременно, а крупные и мелкие фракции совместно образуются в продуктах разрушения (рис. 21, 1), находясь в закономерных взаимных соотношениях. Одним из призна-

Таблица 13

Потеря массы образцов при физическом выветривании, в процентах от первоначальной массы \*

№ обр.	Характер исследуемого материала	Потеря массы
31-72	Жильный кварц, брекчированный, плотный, с незначительной вкрапленностью сульфидов	0,11
17-72	Кварц прожилковый, с включениями гидротермально измененных сланцев и тонкой вкрапленностью сульфидов	0,23
92-72	Жильный кварц с прожилками адуляра	0,36
77-72	Жильный кварц с вкрапленностью рудных минералов (пирит, аргентит) и прожилками адуляра	0,80
89-72	Карбонатная жила с крупными кристаллами кальцита	0,95
75-72 *	Плотная скрытокристаллическая жильная порода кварц-адулярового состава с включениями сульфидов	1,21
83-72	Туфовидная порода с обильной вкрапленностью рудных минералов и прожилками позднего кварца	14,62
83-72а	То же	25,42

\* В составе потерь учтен весь материал мельче 1 мм, включая и жидкую фазу; число циклов выветривания показано на рис. 21, II.

ков начавшегося выветривания является потеря массы образцов в эксперименте. В первой серии опытов не было предусмотрено изучение динамики изменения веса (массы) в зависимости от времени и количества циклов промерзания. Поэтому об интенсивности этого процесса можно судить по начальной и конечной массе образцов (см. рис. 21, II). Интенсивность потери веса, так же как и темп гранулометрической диспергации образцов, оказалась сильно зависящей от степени окварцованности рудного материала, участвовавшего в эксперименте (см. рис. 21, I, II; табл. 13).

Данные табл. 13 показывают, что способность к разрушению при физическом выветривании увеличивается при увеличении гетерогенности материала. По этой причине высокие значения потерь массы получены для обр. 83-72 и его дубликата (83-72а). Уже в первые 100-150 циклов пирокластический материал этих образцов стал интенсивно выкрашиваться, и вскоре произошло разрушение штупа на части. Вследствие достаточно полной диспергации обр. 83-72 отчетливо выявилась динамика развития механизма разрушения в процессе выветривания. По мере дробления образца на крупные обломки

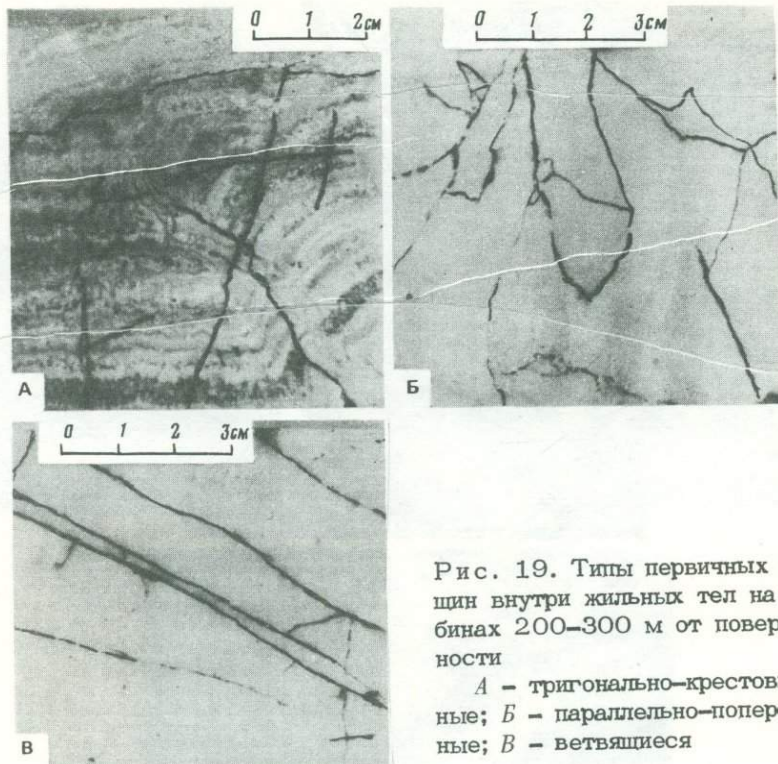


Рис. 19. Типы первичных трещин внутри жильных тел на глубинах 200–300 м от поверхности

А – тригонально-крестовидные; Б – параллельно-поперечные; В – ветвящиеся

синхронно нарастало и количество материала мельче 1 мм (рис. 22) После 450 циклов выветривания содержание этой фракции достигло 2,22%. Следовательно, образование материала песчаной размерности можно рассматривать как функцию продолжительности процесса распада. Иначе говоря, если интенсивность поступления энергии к выветривающейся системе не меняется, а меняется только время, то процесс развивается в том же направлении (увеличение дисперсности), в котором осуществлялось бы разрушение и в случае приложения дополнительной энергии. Дисперсность продуктов выветривания оказывается, таким образом, функционально связанной с временем или энергией процесса выветривания. Это позволяет по поведению той или иной фракции оценить время, необходимое для ее полного исчезновения или для превращения исходного объема руды (горной породы) в дисперсный материал заданной крупности. Сделанный вывод имеет принципиальное значение как для раскрытия механизмов высвобождения россыпеобразующих минералов на всех стадиях формирования россыпей, так и для понимания вообще формирования полидисперсных систем в различные этапы континентального литогенеза.

В первых опытах по моделированию физического выветривания

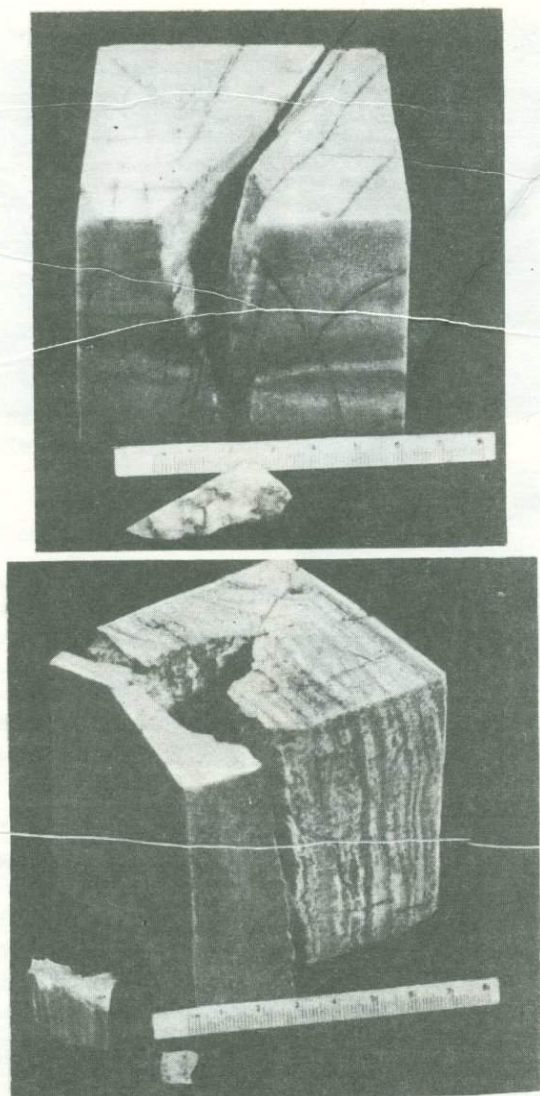


Рис. 20. Распад рудных образцов по системам первичных магистральных трещин

руд не производилось изучение химической составляющей потери массы образцов в процессе выветривания. Однако один из контрольных опытов показал, что уже в первые 50 циклов вода, в которой производилось замораживание и протаивание образцов, становится достаточно заметно минерализованной (табл. 14). Этот факт подтверждает выводы многих исследователей (А.А. Ананяна, И.А. Тютюнова, Н.А. Шило и др.) о значительной химической активности незамерзаю-

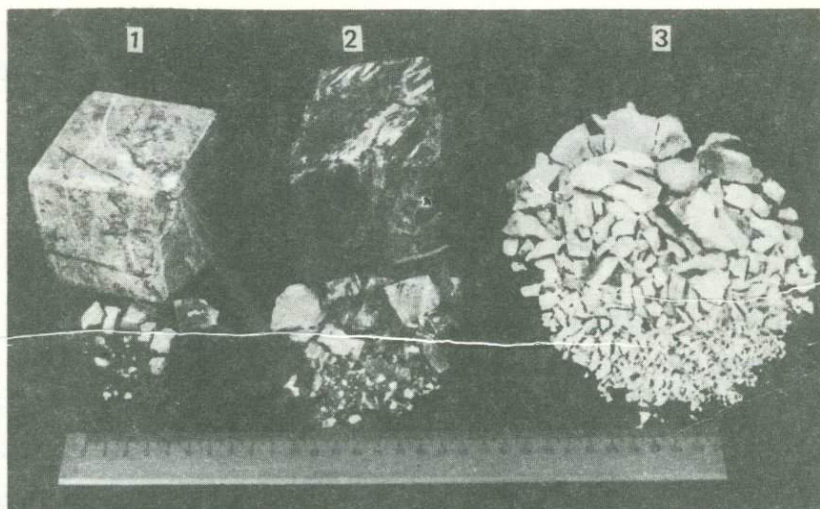
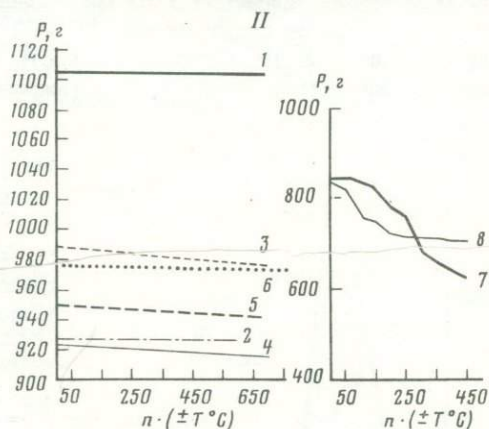


Рис. 21. Различная скорость распада рудных образцов (I) и графики потери массы ( $P$ ) образцов (II) в опыте по физическому выветриванию руд различного состава



Руды: 1 - почти монокварцевые малосульфидные руды (после 700 циклов  $\pm T$ ,  $^{\circ}C$ ); 2 - умеренно-сульфидные руды с большим количеством кварца (после 600 циклов выветривания); 3 - вмещающие туфопесчаники (после 400 циклов); образцы 1 - 17-72; 2 - 31-72; 3 - 75-72; 4 - 77-72; 5 - 89-72; 6 - 92-72; 7 - 83-72; 8 - 83-72а

шей фазы воды в горных породах. Вместе с тем вопрос об удельной роли химической составляющей при физическом выветривании в свете поставленных нами задач оставался не вполне ясным, поэтому нами совместно с В.М. Питулько и В.Л. Сухорословым [115] поставлена специальная серия опытов для изучения хотя бы общей картины этого явления.

В опытах использовалось около 50 образцов золото-кварцевой и золото-серебряной формаций из месторождений Северо-Востока 6. Зак. 757

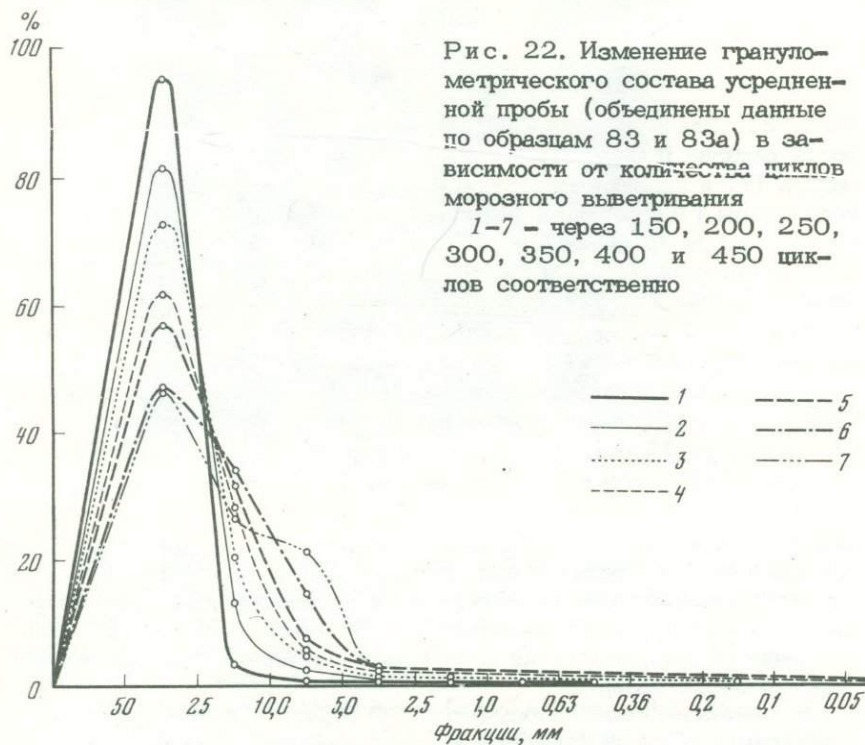
Таблица 14

Состав водной вытяжки из рудных образцов после 50 циклов

$\text{NH}_4^+$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Fe}_{\text{общ}}$
Образец 31-72					
2,0	7,4	3,7	29,96	1,34	0,5
Образец 83-72					
2,0	9,6	23,2	89,61	16,67	5,0

Аналитик Г.П. Филимонова (ВНИИ-1)

СССР. Для интенсификации процесса образцы подвергались УФ-облучению. Методика опытов состояла в том, что каждые 50 циклов образцы высушивались и взвешивались, а полученную жидкую фазу объемом примерно 100 мл исследовали рентгенофлуоресцентным методом на квантометре ARL-72 000 с использованием фильтров-носителей. Достигнутая точность определения составила для легких элементов 30-50%, для тяжелых - 5-10%.



выветривания (в мг/л)

Al	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl	Сухой остаток	pH
Образец 31-72					
10,6	41,6	146,4	-	178,0	7,0
Образец 83-72					
78,0	30,4	463,6	10,0	534,0	7,1

Было установлено, что в первые 50-100 циклов абсолютная величина потерь массы растет наиболее быстро. Для пород и руд разного состава она колеблется в зависимости от количества кварца и сульфидов, а также других неустойчивых минералов и составляет 0,02-5,34% (табл. 15). Наименьшая потеря веса характерна для руд существенно кварцевого состава. Экстраполяция скорости выветривания показывает, что полный распад образцов в зависимости от их состава и строения наступит после  $n \cdot (10^3 \div 10^5)$  циклов, что соответствует интервалу времени от нескольких тысяч лет до нескольких сотен тысяч лет. Надо заметить, что эти данные являются сугубо ориентировочными, а вопрос о реальной скорости выветривания будет рассмотрен позднее.

Наблюдаемые эффекты потери массы хорошо коррелируются с изменениями состава твердых и жидких фаз - продуктов выветривания, что следует связывать с прогрессирующим ростом пористости образцов за счет раскрытия внутренних пор, трещин, выкрашивания их стенок, ребер и т.д. (табл. 16). Влияние минерального состава и текстурно-структурных особенностей матрицы образцов в условиях криогенного выветривания проявляется достаточно отчетливо. Наиболее интенсивное изменение исследованных руд наступает в среднем через 150 циклов для монолитных кварцевых агрегатов, через 100 циклов - для карбонат-кварцевых и через 75 циклов - для материала кварц-сульфидных жил. Минерализация получаемой в опытах жидкой фазы колебалась от 10 до 3000 мг/л. Максимальные значения соответствовали образцам третьей группы (табл. 17). В порядке убывания концентраций в жидкой фазе присутствуют Cl, S, Ca, Mg, Zn, Ni, Ba, Cu, Na и Si. Число микрокомпонентов невелико: As, K, Pb, Zr, Ti, Al, Fe, P, Ag, Sn, Au.

В ходе опыта наблюдается возрастание концентрации серы в растворах, свидетельствующее о развитии атмосферной сульфатизации исходного сульфидного материала и постепенном увеличении степени его окисления. Окисление затрагивало главным образом серу моносульфидов, в исследованных рудах представленных в основном пирротинном.

Таблица 15

Уменьшение массы образцов в процессе морозного выветривания  
(в процентах от первоначальной массы)

№ обр.	Продолжительность выветривания (число циклов промерзания-протаивания)				
	50	100	150	200	250
Плотный жильный кварц мелко- и среднезернистый					
100	0,04	0,05	0,08	0,05	0,06
172	0,06	0,06	0,09	0,07	0,07
101	0,03	0,03	0,05	0,03	0,04
120	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03
750	0,03	0,04	0,08	0,03	0,03
$\bar{x}$	0,036	0,04	0,068	0,04	0,046
$s$	0,014	0,014	0,019	0,013	0,016
Карбонат-кварцевая руда с сульфидизацией					
143-9	0,07	0,14	0,12	0,10	0,09
143-8	0,10	0,14	0,12	0,11	0,10
143-7	0,16	0,29	0,25	0,23	0,19
103	0,10	0,19	0,16	0,14	0,12
7-1	0,07	0,41	0,39	0,11	0,09
76-2	0,16	0,30	0,26	0,23	0,21
$\bar{x}$	0,10	0,24	0,22	0,15	0,13
$s$	0,04	0,098	0,096	0,055	0,049
Кварц-сульфидная руда карбонатизированная					
504	0,07	0,13	0,09	0,10	0,08
508	0,23	0,30	0,28	0,26	0,25
2-1	0,37	0,76	0,70	0,60	0,54
529	0,42	0,82	0,65	0,85	0,94
121	1,51	5,34	4,69	4,80	4,50
$\bar{x}$	0,52	1,47	1,28	1,32	1,26
$s$	1,13	1,97	1,72	1,75	1,64

Примечание.  $\bar{x}$  - среднее арифметическое,  $s$  - среднеквадратичное отклонение. Аналитик В.Я. Борходоев (СВКНИИ).

По убыванию миграционной способности изученные компоненты руд распределялись в виде групп: (Cl, S)-(Zn, Mg, Ca)-(Na, Pb, As, Ag, Mn, Zr)-(Cu, Ti, Ba, Si, Au, Sn)-(K, Al, Fe, P). Этот ряд хорошо согласуется с распределением компонентов по степени их выноса из профиля сульфатных зон окисления, установленным на основе изучения ассоциаций слагающих их вторичных минералов и экспериментов по газофазному криогенному окислению сульфидов. Это свидетельствует также о сходстве в механизмах криогенного

Таблица 16

Изменение пористости образцов в процессе выветривания (по 24 образцам)

Группа образцов	Изменение пористости в процессе выветривания в зависимости от количества циклов ( $n \cdot (\pm T^{\circ}\text{C})$ ), %					
	До опыта	50	100	150	200	250
1*	0,22	0,27	0,29	0,31	0,29	0,28
2	0,86	1,09	1,12	1,14	1,09	1,09
3	1,12	1,33	1,42	1,58	1,41	1,43

\* Группы образцов соответствуют, с некоторыми отклонениями, приведенным в табл. 15.

выветривания природных объектов и их аналогов, находящихся в условиях эксперимента.

Часть образцов в опытах по изучению химической составляющей физического выветривания исследовалась в трех вариантах: штуфы, щебнистая фракция (от 10 до 2 мм) и дресвяная фракция (< 2 мм). Результаты анализов жидкой фазы, полученной во всех трех опытах, показывают, что максимальные изменения при криогенном выветривании происходят с обломками размерностью от 10 до 2 мм (табл. 18). Это связано с тем, что для данного размера обломочных частиц достигается некоторое оптимальное сочетание между общей поверхностью (арена химического выветривания) и интенсивностью раскрытия внутренних дефектов структуры (арена проявления физико-механических процессов). При измельчении материала эффективность физико-механической деструкции снижается, как отмечалось выше, что влечет за собой и снижение химической экстракции компонентов в жидкую фазу.

Интерпретация полученных данных в результате экспериментов по оценке хемогенной составляющей физического выветривания приводит к заключению о том, что в условиях криолитозоны выделяются три типа мигрантов: солевые, механические и смешанные. В комплексе эти мигранты и формируют вторичные ореолы и потоки рассеяния. Принципиально такие же особенности выявлены В.М. Питулька при изучении вторичных ореолов, сформированных в автономных геохимических ландшафтах.

Следующий фактор выветривания, который изучен экспериментально, это ультрафиолетовое (УФ) облучение руд и горных пород. Опыты по оценке влияния УФ-облучения поставлены на 10 образцах эффузивных и эффузивно-осадочных пород, как наиболее податливых к физическому выветриванию. По условиям опыта половина экспериментальных образцов экспонировалась к источнику света, а вторая часть группы (дубликаты) находилась в идентичных условиях опыта, но образцы оставались затененными. В качестве имитатора теплового и светового воздействия применялся аппарат "искусственная погода"

(ИП-1-3 по ТУ 25-97-412-68). В результате 100 циклов выветривания оказалось, что суммарные потери массы экспонированных образцов составили 1,44%, а тех, которые находились в тени, - 0,06% (табл. 19).

Хотя проделанные опыты свидетельствуют о значительном влиянии УФ-облучения на темп выветривания, проведенных исследований недостаточно для окончательного и достоверного суждения о механизмах этого влияния и его количественной стороне. Поэтому при интерпретации данных о скорости физико-химического выветривания

Таблица 17

Распределение элементов в жидкой фазе после 50, 100, 150 и 200 циклов выветривания (в мг/л)

Компонент	Жильный кварц с убогой сульфидной минерализацией (15 проб)				Карбонат-кварцевая руда с заметной сульфидной минерализацией (10 проб)				
	50	100	150	200	50	100	150	200	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Mg	$\bar{x}$	3	1,5	10	6	6	15	6	4,5
	$s$	2,5	3	4,5	4,5	5	6,3	4	2,7
Ca	$\bar{x}$	11	17	20	11	45	83	52	40
	$s$	3,5	6,5	12	4,5	14	22	16	15
K	$\bar{x}$	2	1	1	1	4,3	2,1	3,7	1,2
	$s$	1,6	1,1	-	-	3,9	2,5	2,8	1,1
S	$\bar{x}$	1,4	1	1,4	5,2	1,7	2,6	3,3	9,2
	$s$	0,4	-	1,6	3,5	1,5	1,8	1,8	3,2
Fe	$\bar{x}$	11	16	31	8	61	40	18	4
	$s$	4	3,2	14	4,4	18	16	12	5,3
Mn	$\bar{x}$	0,6	0,5	1	0,5	8,7	1,6	1	0,5
	$s$	0,5	-	0,8	-	8,5	1,1	0,6	-
Zn	$\bar{x}$	1	1	1	1	1	1,8	1	1
	$s$	-	-	-	-	-	0,6	-	-
Pb	$\bar{x}$	0,5	1,7	3,2	1,3	1,1	4	2,6	1,6
	$s$	-	1,2	1,8	1,1	1	2,5	1,8	1,1
Ag	$\bar{x}$	1,2	2	2,5	0,5	0,5	3,5	2,3	0,5
	$s$	0,8	0,9	2,6	-	-	2,4	1,8	-
Au	$\bar{x}$	0,28	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,2	0,4
	$s$	0,16	-	0,4	0,4	0,6	0,5	-	0,3
pH	$\bar{x}$	6,45	6,66	7,15	7,58	6,6	7,4	7,52	8,03
	$s$	0,45	0,5	0,34	0,25	0,4	0,2	0,2	0,17
Eh, мВ	$\bar{x}$	305	289	247	205	274	250	238	210
	$s$	17	32	28	44	35	35	48	42

Примечание.  $\bar{x}$  - среднее арифметическое;  $s$  - среднеквадратичное отклонение.

Таблица 17 (окончание)

Компонент	Кварц-сульфидная руда частично карбонатизированная (18 проб)				Чистая вода	Предел чувствительности	
	50	100	150	200			
1	10	11	12	13	14	15	
Mg	$\bar{x}$	1,3	4	1	1,6	0,8	0,5
	$s$	1,6	2	0,8	0,8	1	
Ca	$\bar{x}$	71	116	25	44	6,8	1
	$s$	19	28	12	12	3,6	
K	$\bar{x}$	1	1,4	1,2	1	1	1
	$s$	-	1,3	1,1	-	-	
S	$\bar{x}$	11	21	22	80	1	1
	$s$	4	8,7	7,5	12	-	
Fe	$\bar{x}$	86	50	18	2	0,6	0,5
	$s$	28	14	11	1,4	0,5	
Mn	$\bar{x}$	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$s$	0,8	-	-	-	-	-
Zn	$\bar{x}$	3,2	1,8	1	1,8	1	1
	$s$	2,1	0,9	-	1,6	-	-
Pb	$\bar{x}$	1,2	4,4	1,7	1,4	0,5	0,5
	$s$	1,1	5,5	1,5	1,4	-	-
Ag	$\bar{x}$	1,5	4,2	3,5	1,2	0,5	0,5
	$s$	1,2	2,7	2,2	1,1	-	-
Au	$\bar{x}$	0,3	0,7	0,2	0,3	0,2	0,2
	$s$	0,3	1,2	-	0,2	-	-
pH	$\bar{x}$	3,68	4,26	5,35	6,4	6,45	-
	$s$	0,93	0,71	0,66	0,8	0,25	-
Eh, мв	$\bar{x}$	331	308	276	224	-	-
	$s$	34	32	28	41	-	-

влияние солнечного освещения не принималось во внимание. Предполагалось, что поверхность выветривающихся пород была освещена в среднем одинаково для всех сравниваемых типов пород.

Опыты по термическому разрушению поставлены в целях получения дисперсного материала и сравнения гранулометрического спектра этого материала с гранулометрическим спектром, полученным другими способами. Образцы нагревались до 600–700°C и погружались в воду с температурой 20°C. При этом наблюдались почти одноактное интенсивное растрескивание и распад образцов на обломки различной крупности. Основной целью этих опытов было выяснение вопроса, какие отличия в картину разрушения вносит изменение разрушающего воздействия. В геологических обстановках резкие перепады температур (термошоки в терминологии французских специалистов) не являются чем-то необычным. Они характерны для подводного

Таблица 18

Сравнительные данные о содержании (в мг/л) некоторых элементов образцов

Тип руды	Фракция, мм	Mg	Ca	Fe
Плотный жильный кварц с бедной вкрапленностью пирита	>100	1,6	12	10
	2-10	1,7	14	12
	<2	2,0	8	10
Жильный кварц сульфидизированный	100	2,0	53	45
	2-10	1,7	14	14
	<2	3,0	27	52
Карбонат-кварцевая жила сульфидной минерализации	>100	5,2	110	57
	2-10	11,0	375	40
	<2	2,5	155	55
Кварц-сульфидная жила карбонатизированная	>100	12,0	65	44
	2-10	6,8	125	132
	<2	18,0	118	60

Примечание. Значения концентрации равны среднеарифметическому из трех экспериментов.

и наземного вулканизма, имеют место при соприкосновении дождевых капель с нагретой поверхностью горных пород, при попадании прогретых обломков в воду речных потоков и т.д. Для решения вопросов, связанных с высвобождением россыпеобразующих минералов из обломков руд и пород, опыты по термошокам представляют интерес для интерпретации некоторых общих закономерностей распада рудных тел и горных пород при физико-механическом воздействии.

Полученные нами результаты опытов по разрушению образцов с помощью теплового удара не внесли в картину физического распада принципиально новых черт. Механизм разрушения аналогичен разрушению при циклическом промерзании-протаиванию, но развивался в резко ускоренном темпе. Стадия докритического подрастания трещин непосредственно переходила в стадию лавинного трещинообразования, и образец распадался на обломки различной крупности, гранулометрический спектр которых подобен спектрам, образующимся при других вариантах разрушения.

Эти опыты ярко иллюстрировали также тот факт, что крупнообломочное дробление и образование песчаного и тонкодисперсного материала являются единовременным актом распада каждого более крупного обломка руды или породы.

Четвертая группа опытов по моделированию физического выветривания под воздействием различных факторов заключалась в статическом сжатии до разрушающего напряжения. Стандартные образцы кубической формы (такие же, как и во всех остальных опытах) подвергались одноосному сжатию под прессом ПСУ-50. Было раз-

в жидкой фазе, полученной после 50 циклов заморзания-оттаивания

S	Pb	Zn	Ag	Au
2,0	1,2	1,0	1,2	0,19
1,0	1,8	1,0	1,2	0,20
1,0	1,2	1,0	1,2	0,20
2,7	0,5	2,5	2,2	0,30
4,2	1,2	1,0	2,5	0,30
8,4	1,8	5,0	1,8	0,30
2,5	1,1	1,0	2,5	0,45
18,0	2,1	3,0	3,0	0,50
51,0	1,2	1,5	1,8	0,30
16,0	2,8	5,0	3,2	0,50
100,0	3,7	10,0	4,6	0,75
86,0	2,5	5,0	3,0	0,45

рушено таким образом более 200 образцов руд, горных пород и других хрупких материалов из месторождений и рудных полей Северо-Востока СССР, Якутии, Центральной Европы (ЧССР). Часть опытов и интерпретация их результатов проводились нами совместно с сотрудниками Лаборатории сейсмологии и физических свойств горных пород Л.И. Измайловым и С.В. Мишиным (СВКНИИ ДВНЦ АН СССР).

Как и в предыдущих опытах, основным объектом изучения являлся материал, полученный при разрушении образцов, в частности распределение частиц по крупности, массе и поверхности частиц в каждой размерной фракции. Разрушение проводилось при равномерном увеличении давления (около 0,3 т/с) до момента непосредственного разрушения, когда давление резко падало практически до нуля.

Процесс разрушения характеризовался следующими измеренными параметрами: масса и размеры образца до опыта; время процесса разрушения от момента приложения нагрузки до раскалывания ( $T$ ); максимальная разрушающая нагрузка ( $P$ ); импульс приложения силы к образцу ( $U$ ); распределение разрушенного материала по размерам частиц; численное значение величины поверхности разрушенного материала ( $S$ ). Перед опытами образцы группировались в зависимости от их петрографических свойств, пористости, степени выветрелости и т.д. По результатам экспериментов определяли также отношение массы крупных частиц к массе мелких, отношение импульса силы к образуемой при разрушении поверхности дисперсного материала и другие параметры. Конструкция пресса позволяла изменять скорость увеличения давления. Для непрерывной регистрации давления во вре-

Таблица 19

Влияние УФ-облучения на скорость физического выветривания  
(в течение 100 циклов)

Выветривание без УФ-облучения			Выветривание при УФ-облучении		
№ обр.	Масса до опыта, мг	Потеря массы, мг/%	№ обр.	Масса до опыта, мг	Потеря массы, мг/%
1	164814,0	49,2 0,03	1а	161583,0	4435,8 2,74
2	160948,0	-24,8* 0,01	2а	134039,0	131,7 0,10
3	163401,0	98,8 0,06	3а	130988,0	18,0 0,01
4	123395,0	285,0 0,23	4а	182783,0	5258,1 2,88
5	175810,0	102,9 0,06	5а	157959,0	1213,4 0,77
Суммарная величина потерь		511,6 0,06	Суммарная величина потерь		11057,0 1,44

\* В данном образце вес увеличился.

мени на прессе был установлен индуктивный датчик давления, отградуированный по шкале давлений с погрешностью 0,3–0,4 т. Процесс изменения давления на образец регистрировался с помощью перописущего прибора в виде кривой при развертке 0,5 см/с. Процесс разрушения длился от момента включения пресса (приложения нагрузки на образец) до характерного звука, сопровождаемого резким падением давления, что фиксировалось на графике самописца. После разрушения материала его частицы убирались из рабочей области пресса и производилась запись холостого хода, т.е. набора давления до максимального значения давления, отмеченного на кривой рабочего хода. Полученные графики позволили вычислить общий импульс силы ( $U_0$ ), затраченный на разрушение образца:

$$U_0 = \int_0^{\tau} P(t) dt, \quad (4)$$

где  $P(t)$  – давление на образец в зависимости от времени. Импульс  $U_0$  определяет как процесс разрушения, так и внутреннюю работу пресса, поэтому следует определить и часть импульса силы  $U_x$ , характеризующую затраты энергии, не связанные с разрушением. Импульс силы  $U_x$  вычисляли, как и предыдущий, из записей холостого хода пресса. Импульс силы, затраченный непосредственно на разрушение ( $U$ ), находили как разность  $U_0$  и  $U_x$ , т.е.  $U = U_0 - U_x$ . Таким образом, импульс силы ( $U$ ) в сущности определял энергию, затраченную на разрушение образца. Размерность импульса силы ( $LMT^{-1}$ ) отличается от размерности энергии ( $L^2MT^{-2}$ ) на раз-

мерность скорости ( $LT^{-1}$ ). Однако в случае равного темпа изменения давления при холостом и рабочем движении пресса можно считать равной и скорость упругого изменения размеров образца — в этом случае импульсы силы пропорциональны энергии, затраченной механизмом на разрушение. Полученный при разрушении материал распределялся на фракции по обычной методике гранулометрического анализа. Это позволяло по размерам частиц оценить полную поверхность трещин, вдоль которых нарушалась сплошность разрушенного материала.

Анализ данных, полученных в опытах по разрушению руд и пород статическим сжатием, приводит к двум принципиально важным заключениям. Прежде всего следует отметить, что разрушение рудного вещества и кристаллических горных пород происходит в соответствии с теорией прочности и представлениями физики разрушения, рассмотренными выше. Разрушение развивается по поверхностям, характеризующимся наименее сильными связями по отношению к приложенному давлению. Отчетливо фиксировались как начало процесса разрушения (докритическая стадия), так и стадия лавинообразного роста трещин — окончание процесса разрушения. Сравнение гранулометрических спектров материала, полученного при моделировании выветривания, со спектром разрушения при одноосном сжатии показывает, что процесс разрушения в обоих случаях развивается сходным образом. Это позволяет при определенных условиях длительные опыты по моделированию выветривания заменить разрушением образцов одноосным сжатием, что значительно ускорило бы решение задач по оценке интенсивности высвобождения россыпеобразующих минералов в зависимости от крупности минералов, текстурно-структурных особенностей рудного вещества и т.д.

Вторым важным выводом является подтверждение энергетической обусловленности гранулометрического спектра дисперсного материала, получавшегося в опытах по статическому сжатию. Распределение масс и поверхности частиц разного размера обнаруживает зависимость от величины разрушающего давления (рис. 23), а отношение массы крупных частиц к массе мелких падает с увеличением энергоемкости процесса. Следовательно, эти данные свидетельствуют о единстве всех процессов физического распада независимо от того, происходит ли разрушение в природной среде или искусственно моделируется в лаборатории. Наличие энергетической обусловленности физического выветривания и всех других видов физического разрушения дает необходимый критерий для сопоставления всех природных процессов выветривания.

В заключение характеристики экспериментального изучения физических факторов выветривания и разрушения руд и горных пород в естественных и лабораторных условиях следует коснуться еще двух опытов — изучения влияния влагонасыщенности на прочность образцов и на разрушение при гидромеханических процессах. Опыты по оценке прочности сухих и влажных образцов проводились также с помощью одноосного сжатия. Выполнен ряд серий определений прочности, которые дали несколько разноречивые результаты. В одних

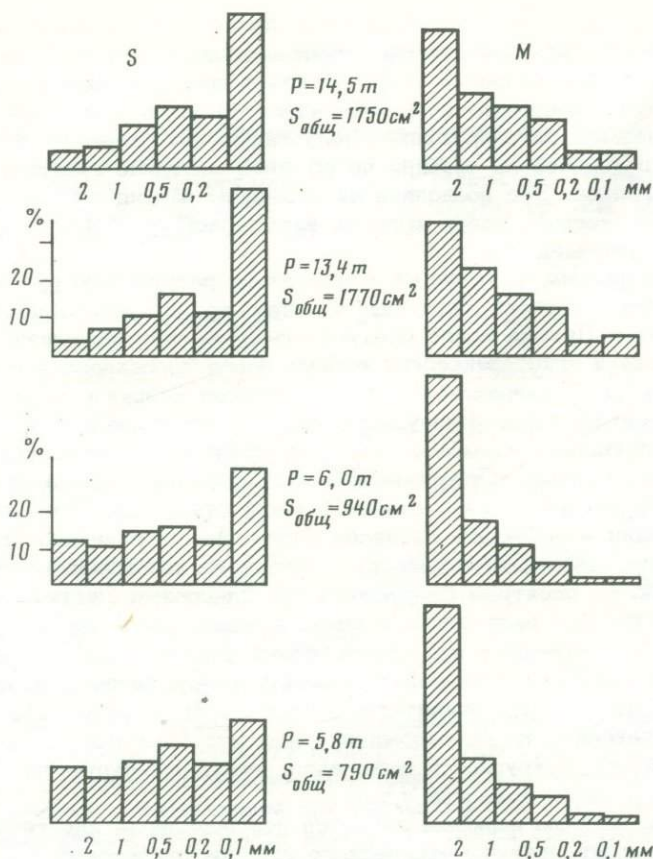


Рис. 23. Распределение поверхности (S) и массы (M) частиц различной крупности в опытах по статическому сжатию руд и горных пород в зависимости от величины нагрузки (P)

случаях совершенно идентичные по своим петрофизическим свойствам образцы обнаруживали значительные различия в прочности при сухом и влажном состоянии, в других - различия были незначительными. Уменьшение прочности более чем 30 влагонасыщенных образцов составило 11,2%. Заключительная серия опытов поставлена для изучения гидромеханического дробления обломочного материала. Причем эти опыты имеют значение для понимания и процессов физического выветривания, и процессов дифференциации материала в русле. Поэтому мы будем касаться этих опытов и ниже, в разделе о русловых процессах.

Опыты по моделированию гидромеханического дробления обломочного материала проводились в специально разработанном кольцевом гидрлотке [217], позволяющем проводить эксперименты в пределах натуральных значений скорости водного потока, крупности обломоч-

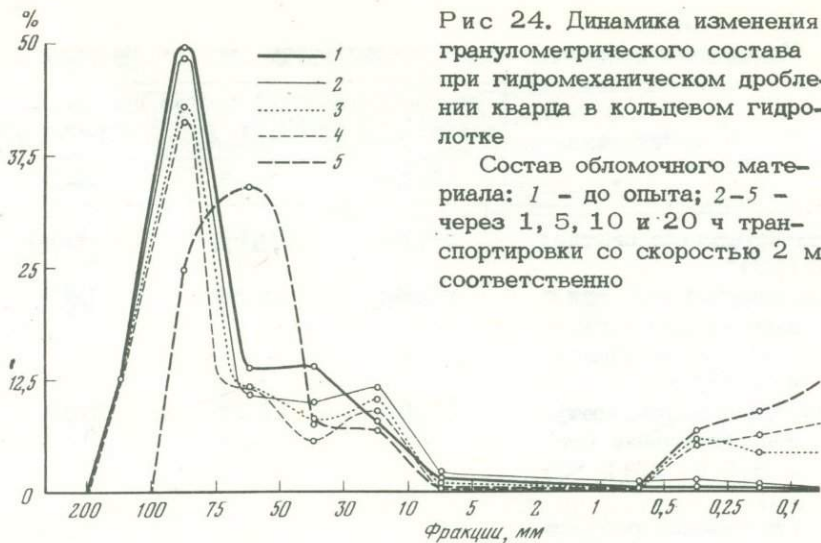


Рис 24. Динамика изменения гранулометрического состава при гидромеханическом дроблении кварца в кольцевом гидроротке

Состав обломочного материала: 1 — до опыта; 2-5 — через 1, 5, 10 и 20 ч транспортировки со скоростью 2 м/с соответственно

ного материала, глубины потока и т.д. Методика состояла в том, что через определенные интервалы времени обломочная смесь извлекалась из устройства для изучения и взвешивания, после чего снова закладывалась в прибор и опыт продолжался. Наиболее интересная часть информации, полученная в результате этих опытов, состояла в том, что картина дробления материала, выявляемая по гранулометрическому спектру, оказывается принципиально сходной с закономерностями процесса разрушения, выявленными в предшествовавших опытах. График распределения обломочного материала имеет вид одновершинной кривой (рис. 24), форма которой меняется по мере снижения количества крупного и увеличения содержания мелкого материала. Эти результаты позволяют процесс высвобождения россыпеобразующих минералов в русле идентифицировать со всеми другими механизмами высвобождения минералов при физическом распаде руд в процессах выветривания.

#### Общий анализ результатов изучения физического выветривания

Полевые исследования и лабораторное моделирование физического выветривания приводят к выводу, что наиболее общим свойством этого геологического процесса является его энергетическая обусловленность. Как и всякий природный процесс, выветривание не может идти самопроизвольно, оно требует затрат энергии на разрыв физических связей и на переход материала из монолитного в дисперсное состояние. При этом необходимо обратить внимание на кажущуюся очевидной и тривиальной, но очень важную для геологических приложений зависимость степени дисперсности от общего количества расходуемой на деструкцию энергии, но независимость от конкретного вида разрушающего воздействия (термодислокации, глиационап-

Таблица 20

Усредненные данные о гранулометрическом составе дисперсного

Способ разрушения	Гранулометрический состав продуктов разрушения (фракции, мм; содержание, %)			
	30-10	10-5	5-2	
Статистическое сжатие (16)*	54,37	20,18	11,13	
Термический удар при нагреве до 800°C и быстром охлаждении до 20°C (6)	55,62	31,72	6,49	
Циклическое температурное разрушение (от -25±3 до 25±10°C) (5)	77,83	17,08	2,33	
Гидравлическое разрушение в водном потоке:				
а) до опыта	72,60	8,20	7,90	
б) через 10 ч	50,20	18,60	10,10	

\*В скобках - число образцов, участвовавших в опытах.

ржения, гравитационно-ударные явления и т.д.). На данной стадии исследований наиболее удобным способом иллюстрации отмеченной особенности формирования дисперсных систем в процессах выветривания может служить гранулометрический спектр полидисперсных смесей. Анализируя гранулометрические спектры дисперсных смесей, полученных при многочисленных опытах и разными способами разрушения (табл. 20), а также расход энергии на осуществление дезинтеграции монолитных руд и пород в условиях природных процессов и лабораторных экспериментов, можно представить общую картину физического выветривания, достаточно строго согласующуюся с представлениями теории прочности.

Приложение к телу внешней энергии независимо от того, будет ли это циклическое нагревание-охлаждение, динамическое или статическое воздействие, вызывает разрывы межатомных связей внутри тела. Во всех случаях эти разрывы начинаются по наиболее перенапряженным направлениям, которыми оказываются дефектные зоны, блоки разграничения неоднородностей, направления спайности и т.п. Случайный характер распределения ослабленных зон в структуре твердых тел приводит к тому, что стереометрическая модель разрушения реализуется в близком к стохастическому распределению по своим размерам обломков и частиц, продуцируемых при дроблении.

Поскольку измельчение вещества горных пород при физических процессах пропорционально количеству энергии природных процессов, ведущих к измельчению, и обратно пропорционально прочности мате-

материала при различных способах разрушения рудного вещества

Гранулометрический состав продуктов разрушения (фракции, мм; содержание, %)				
2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
5,15	2,78	2,95	1,17	2,19
1,84	0,88	0,65	0,22	2,56
0,95	0,49	0,38	0,93	0,01
4,60	3,00	2,00	0,90	0,80
2,80	4,00	4,60	2,80	6,90

риала, то в принципиальном виде зависимость между указанными параметрами можно представить в виде

$$B_d(t) = B_0 + \frac{U_M(t) + U_T(t)}{C(t)}, \quad (5)$$

где  $B_d$  - содержание фракции с размером зерна  $d$  в тот или иной момент времени;  $B_0$  - содержание той же фракции в начальный момент времени ( $t = 0$ );  $U_M(t)$  - затраты механической энергии естественных процессов;  $U_T(t)$  - расход тепловой энергии;  $C(t)$  - прочность материала, представляющая собой также величину, в которую необходимо вкладывать энергетический смысл.

Полученное соотношение (5) показывает, что задача восстановления истории разрушения в любом природном процессе должна свестись к оценке законов изменения и характера приложения энергии и к характеристике физических свойств руд и горных пород, подвергающихся разрушению в процессах выветривания. В сущности, речь идет о простых физических соотношениях, связывающих все литогенетические процессы и определяемых взаимодействием энергетических параметров кристаллической решетки минералов, образующих рудную массу или вещество горной породы, с параметрами физико-географической среды.

Однако изложенные выше общие результаты изучения физического выветривания в полевых и лабораторных условиях содержат лишь принципиальную основу для суждения о сущности выветривания. Они

далеко не достаточны, например, для аналитического решения задачи по оценке физического выветривания рудного вещества различного минерального состава. Хотя в последние годы накапливается все больше данных о физических свойствах породообразующих минералов, тем не менее решение этой задачи потребует специальных исследований, на основе которых можно будет создать удовлетворительную аналитическую модель выветривания.

Таким образом, общий анализ изложенных данных приводит к заключению, что физическое выветривание есть процесс перехода плотной руды или горной породы в дисперсное состояние под воздействием физико-механических факторов. Исключением являются процессы дробления руд и пород в технологических операциях. Во всех же других случаях – распад рудного материала под действием температурных колебаний, в результате расклинивающего действия льда, трения обломков при движении на склоне, соударения в водном потоке – все это явления одного порядка, приводящие к одному и тому же результату – образованию полидисперсной системы. И если иметь в виду, что в выветривающейся руде имеются ценные минеральные компоненты, то физическое выветривание – мощный и универсально проявляющийся фактор сегрегации этих компонентов из рудного вещества. Вполне понятно, что физическое выветривание в чистом виде в природных условиях проявляется лишь в особых случаях, а обычно сопровождается в большей или меньшей степени выраженными химическими процессами.

#### ХИМИЧЕСКОЕ ВЫВЕТРИВАНИЕ РУД И ГОРНЫХ ПОРОД

Приступая к характеристике химического выветривания и его значения в геологии россыпей, необходимо сделать несколько существенных оговорок, ограничивающих рассмотрение вопроса рамками решаемой нами задачи. Прежде всего необходимо отметить, что в отличие от геохимии, учения о корях выветривания или почвоведения, где преимущественно исследуется баланс вещества в элементной форме или в форме растворимых соединений, коллоидов и т.д., для геологии россыпей основное значение имеет баланс вещества в минеральной форме. Повышенная устойчивость россыпеобразующих минералов к химическому воздействию позволяет им как бы выпадать из геохимического круговорота вещества на земной поверхности (или по крайней мере значительно отставать от этого круговорота) и накапливаться в тех или иных литогенетических комплексах. Из сказанного следует весьма важная методическая особенность решения проблемы выветривания в геологии россыпей. Она состоит в том, что при исследовании физико-химических условий формирования россыпей отпадает необходимость изучать химические свойства россыпеобразующих минералов. Можно ограничиться свидетельством самой природы, дающей неопровержимые доказательства химической инертности минералов, накапливающихся в россыпях (разумеется, исключая миграцию микролишевых элементов *Au*, *Pt*, *Sn*).

Таким образом, задача изучения химического выветривания рос-

россыеобразующих руд и пород сводится лишь к тому, чтобы выяснить закономерности химического выветривания матричных образований, т.е. минералов, заключающих в себе первоначально россыеобразующие минералы. При этом главной и принципиальной особенностью нахождения россыеобразующих минералов в руде является отсутствие в большинстве случаев тесных химических связей между ценным минералом и матричным минералом-хозяином. Россыеобразующие минералы — это, как правило, продукты физико-химического обособления определенных элементов в момент кристаллизации рудного вещества. Эти элементы находят свою минеральную форму устойчивого существования в данных термодинамических условиях, которая связана с матричным веществом парагенетически. Поэтому и для разрыва связи россыеобразующих минералов с минералом-матрицей вовсе не требуется участия химических процессов. Если и происходит наложение химических процессов на разрушающуюся физико-химическую систему (рудное тело), то роль этих процессов может состоять лишь в пассивной деструкции матричного вещества, теряющего в результате этого связь с заключенными в нем россыеобразующими минералами. В качестве матричного вещества, в котором заключены россыеобразующие минералы, в большинстве случаев выступают минералы класса силикатов. Это достаточно устойчивые и неохотно вступающие в химические взаимодействия минералы, что затрудняет их изучение и накладывает определенные ограничения на экспериментальные работы по их выветриванию в лабораторных условиях. Один из крупнейших знатоков силикатов — Шателье еще 50 лет назад подчеркивал, что наибольшим затруднением при изучении силикатов является невозможность заставить их реагировать, поскольку "реакции присоединения, замещения или двойного обмена, которые составляют всю химию растворимых солей, здесь чрезвычайно редки" [192, с. 257-258].

Отмеченные особенности кремнийсодержащих минералов присущи им далеко не в одинаковой степени. Наряду с весьма устойчивыми в химическом отношении силикатами (кварц, турмалин) известны и сравнительно нестойкие к химическому воздействию минералы (оливин, пироксен и др.). Совершенно очевидно, что одно это обстоятельство вынуждает отказаться от универсальной схемы выветривания горных пород, бытующей ныне в геологии россыпей, и попытаться дифференцировать этот процесс в соответствии с типом минераловмещающей рудной среды. Но прежде всего несколько замечаний о механизмах химического выветривания.

#### Кристаллохимические механизмы выветривания

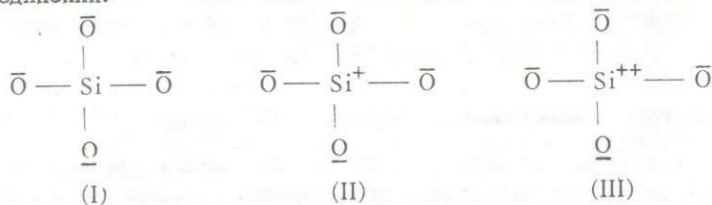
Задаваясь вопросом о закономерностях химического выветривания рудного вещества, мы не можем рассматривать выветривание иначе, как процесс разрушения кристаллохимической структуры минералов. Кристаллохимические постройки силикатов, по В.И. Лебедеву [74], представляют собой укладку атомов, в которой строительными кирпичиками являются атомы кислорода, а роль цемента вы-

полняют другие элементы. С этой точки зрения можно выделить три группы элементов, входящих в молекулы силикатов: элементы с потенциалом ионизации меньше электроотрицательности кислорода, равной 384 ккал (Li, Na, K, Mg, Ca, Mn, Fe); элементы, у которых часть валентных электронов имеет потенциалы ионизации меньше электроотрицательности кислорода (Be, B, Al, J, Si, Ge, Ti, Zr, P, As, V, S, Cl); элементы, у которых все электроны имеют энергию отрыва больше электроотрицательности кислорода (F, H).

Интересно взаимоотношение кислорода и кремния. Кислород обладает двумя валентными холостыми электронами. Электроотрицательность кислорода 383,67 ккал, а с учетом второй пары электронов приближается к значению 567 ккал. У кремния потенциалы ионизации для всех его валентных электронов равны:  $J_1 = 187,2$ ;  $J_2 = 375,3$ ;  $J_3 = 769,1$ ;  $J_4 = 1036,6$  ккал. Электроотрицательность кремния примерно равна 201 ккал, поэтому встреча атома кремния с атомом кислорода легко поведет к отрыву двух электронов от кремния и к приобретению кислородом по одному заряду на каждый атом. Таким образом, подчеркивает В.И. Лебедев, наиболее выгодное энергетическое состояние кислорода и кремния достигается в  $\text{SiO}_2$ , когда кремний двухвалентен и двухзаряден положительно, а кислород одновалентен и однозаряден отрицательно.

Стремясь к энергетически наиболее выгодному состоянию и являясь доминирующим элементом в природе, кислород в процессе кристаллизации вовлекает в свои постройки такой набор атомов, который не противоречит принципу энергетически наиболее выгодного состояния образующегося соединения. В одних случаях, будучи насыщен до одновалентного состояния, кислород присоединяет элементы, дающие максимальное количество атомных связей (Si, P, C, S), и образует комплексные анионы  $\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . В других случаях, будучи насыщен атомной связью за счет Si, Al, H и получая за счет Si и Al по одному электрону, кислород нуждается в ионной связи и вовлекает в решетку элементы, легко дающие такую связь, — Na, K, Ca, Mg.

Влияние степени ионизации кремния на образование структур силикатов схематически может быть выражено различными сочетаниями атомов кремния и кислорода, которые В.И. Лебедев предлагает изображать по аналогии со структурными формулами органических соединений:



В случае реализации варианта (I) образуются силикаты изолированных тетраэдров, варианта (II) — силикаты цепочечно-кольцевой структуры и при варианте (III) — так называемые вязные струк-

туры [74]. Расстояние между Si и O для каждого из трех вариантов равно соответственно 1,70, 1,61 и 1,59 Å. Характерный для кварца третий вариант связи кремния и кислорода соответствует в его молекуле наименьшему расстоянию между атомами кремния и кислорода, что также способствует повышенной прочности данного соединения.

В свете изложенных представлений причины разной устойчивости минералов выступают более ясно. В одних минералах, таких, как оливин, пироксены, амфиболы и другие, количество электронов с энергией отрыва меньше электроотрицательности кислорода (384 ккал) преобладает над числом элементов (электронов) с энергией отрыва, превышающей электроотрицательность кислорода. В других минералах (каолин, мусковит, сульфаты и т.д.) электронов, имеющих энергию отрыва меньше электроотрицательности кислорода, меньше 50%. Такие минералы будут более устойчивы и в тем большей степени, чем сильнее у них выражено отмеченное качество. С этой точки зрения кварц также выглядит более сбалансированным минералом, чем, например, оливин (форстерит)  $Mg_2SiO_4$ , построенный из тетраэдров  $SiO_4$ , связанных между собой ионами Mg, находящимися в окружении шести атомов кислорода. Связи между O и Si, а также между O и Mg неодинаковы: каждый атом кислорода связан с кремнием полной целой связью и находится на расстоянии в среднем 1,67 Å, а этот же атом связан с магнием только одной третью связи и находится в среднем на расстоянии 2,03 Å.

Отмеченные соотношения приводят к тому, что Mg будет легко вымываться из кристаллической решетки минерала при выветривании, так как на отрыв одного электрона от магния требуется в среднем 260 ккал, а на отрыв одного электрона от кремния понадобилось бы 592 ккал, что значительно превышает электроотрицательность кислорода, поэтому процесс в этом направлении не идет. Этот же вывод следует и из того соображения, что в форстерите связи O-Si ковалентные, а связи O-Mg ионные, которые разрушаются значительно легче.

У.Д. Келлер показал [61], что энергия образования связей в основных группах силикатов неодинакова (табл. 21).

Полученный порядок энергий связан с устойчивостью минералов к выветриванию. У.Д. Келлер также подчеркивает, что если силикатные группы соединяются относительно слабыми связями через катионы Mg, Fe, Ca, то эти слабые катионные мостики должны легко разрушаться, вследствие чего и происходит разложение железо-магnezияльных силикатов до уровня кремне- и алюмокремнекислородных тетраэдров.

Близкие к взглядам В.И. Лебедева и У.Д. Келлера представления развивает И.И. Гинзбург [30]. Е.Г. Куковский [70] отметил, что рассчитанные И.И. Гинзбургом энергетические уровни для минералов характеризуют тот вклад энергии, который должна вносить внешняя среда для разрушения минерала при выветривании. Наиболее вероятным и активным агентом разрушения, по Е.Г. Куковскому, служит ион водорода, являющийся носителем некоторой свободной энергии.

Таблица 21

Энергетическая последовательность силикатов (при отнесении числа Si—O-связей к 24 атомам кислорода) по У.Д. Келлеру, с изменениями

Тип силикатов	Структурная единица Si—O-связи	Энергия связи, ккал
Островные	SiO <sub>4</sub>	18852
Групповые	Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	21511
Цепочечные	SiO <sub>3</sub>	25048
Ленточные	Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub>	27290
Листовые	Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	29981
Каркасные	SiO <sub>2</sub>	37320

Для проникновения протона в кристаллическую решетку минералов требуется наличие дефектов или сравнительно рыхлых зон в структуре решетки и ее недонасыщенность положительными зарядами. Содержащиеся в решетке многих силикатных минералов крупные катионы (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) вследствие несоразмерности их с ребрами кремнекислородных тетраэдров не упакованы плотно в кристаллической решетке [5]. Это дает возможность легко извлекать крупные катионы из кристаллической структуры кислыми растворами, что создает дефицит катионов и еще более облегчает проникновение иона водорода в решетку выветривающего минерала.

На основании экспериментального изучения механизмов взаимодействия минералов с водой Л.А. Матвеева [90] также пришла к выводу, что процесс выветривания обусловлен стремлением системы горная порода — вода к минимуму свободной энергии. Разрушение исходных пород и минералов при взаимодействии с водными растворами происходит, согласно данным Л.А. Матвеевой, по типу инконгруэнтного растворения с преимущественным выносом Na, K, Ca на первом этапе разрушения. Отмечается неполное и избирательное разрушение связей кремния с кислородом (прежде всего распад наименее прочных).

Отмечаемый многими исследователями вынос из структуры силикатов ионов калия, натрия, кальция, магния и других катионов интересен в том отношении, что структура силикатов становится более рыхлой и частично распадается на дисперсные образования. На это обращает внимание Е.Г. Куковский; он полагает, что уход из структуры минералов крупных катионов вызывает их диспергацию, образование коллоидных или истинных растворов с дисперсной фазой, представленной обломками исходных, частично измененных минералов. Это подтвердила и Л.А. Матвеева, отметив сильную диспергацию разрушаемого минерала и последующую миграцию в форме тонкодисперсной взвеси (особенно при пониженных температурах) [90, с. 125]. Этот факт имеет важное значение для интерпретации сущности физического и химического выветривания и будет подробнее рассмотрен ниже.

Несколько забегаая вперед, отметим, что появление дисперсной фазы в процессе химического выветривания зафиксировано и в наших экспериментах. Таким образом, при химическом выветривании руд и горных пород главным фактором, определяющим поведение матричных минералов, следует считать химический состав и структурно-энергетические свойства кристаллических решеток этих минералов, определяемых, в свою очередь, квантово-химическими свойствами элементов. Наиболее энергоемким является разрушение ковалентных и ионно-ковалентных связей. Именно энергетической неравноценностью и разным характером химических связей в кристаллической решетке объясняет современная химия преимущественное разрушение одних связей по сравнению с другими.

Однако особенностями химической связи кислорода с кремнием вопрос поведения минералов при выветривании не исчерпывается. Существенно иначе ведут себя минералы, представляющие собой соединения металлов и серы. В.И. Лебедев, рассматривая причины связи одних элементов с кислородом, а других — с серой, отмечал, что эти особенности не обусловлены типом ионов или разностью потенциалов ионизации. По мнению этого исследователя, в земной коре образуются главным образом такие соединения, которые характеризуются максимальной энергетической прочностью входящих в них частиц, т.е. в большей или меньшей степени отвечающие требованиям максимальной энергетической выгоды. Повышенная электроотрицательность кислорода к первому электрону, значительно меньший ионный объем приводят к тому, что у кислорода ярче проявляются свойства к образованию ионных и особенно полуионных связей. Наоборот, сера ввиду меньшей электроотрицательности и большего ионного объема не имеет выраженного стремления к ионной связи, а более склонна к образованию атомной связи. Определенное значение, по В.И. Лебедеву, имеет также укладка атомов. В атомной кислородной упаковке, например, в тетраэдрическом окружении могут находиться атомы с радиусом от 0,15 до 0,27 Å. В атомной же упаковке серы в том же тетраэдрическом окружении могут быть атомы с радиусом, почти в 2 раза большим, — от 0,23 до 0,43 Å. Это же правило сохраняет свое значение и для октаэдрического окружения. Следовательно, кислород может давать плотнейшие ионные решетки с большинством элементов и нередко энергетически более выгодные, чем сера. С этими выводами В.И. Лебедева хорошо согласуются данные Н.В. Белова [7], показавшего принципиальные различия соединений с крупными и мелкими катионами. Вследствие отмеченных причин сульфидные минералы в присутствии кислорода оказываются неустойчивыми и легко разлагаются, образуя окислы и сульфаты металлов.

Итак, выше были приведены данные о некоторых кристаллохимических особенностях двух групп минералов — силикатов и сульфидов. Именно силикаты и сульфиды чаще всего являются матричным минеральным веществом, в котором заключены россыпеобразующие минералы. Поэтому соотношение силикатов (а точнее, кварца) и сульфидов оказывается весьма важным для россыпеобразующих формаций

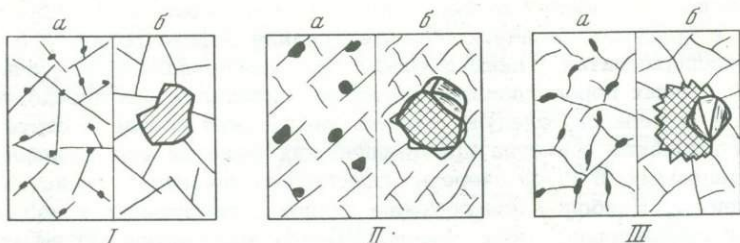


Рис. 25. Принципиальные схемы различных вариантов соотношения россыпеобразующих и вмещающих (матричных) минералов

I — устойчивый минерал в устойчивом (золото в кварце, касситерит в кварце и т.д.); II — устойчивый минерал в матрице неустойчивого (платина в дунитах, алмаз в кимберлите); III — устойчивый минерал в оболочке или сростании с неустойчивым, но в матрице устойчивого; а, б — при мелких и крупных включениях россыпеобразующих минералов соответственно

золота и в определенной степени олова. Для формаций платины и алмазов кварц теряет свои функции минерального каркаса рудного вещества, и на смену ему приходят железо-магнезиальные силикаты. Приведенные выше подсчеты различной устойчивости россыпеобразующих формаций (см. табл. 4) отражают, в сущности, различия в устойчивости матричных минералов. Сростания россыпеобразующих и вмещающих их минералов можно разделить на три простых варианта (рис. 25). Для решения вопроса о роли химического выветривания в россыпеобразовании следовало бы рассмотреть только II и III типы сростаний. Тип связи "устойчивый в устойчивом" не подвержен химическому воздействию, однако этот факт иногда подвергается сомнению, в связи с чем целесообразно рассмотреть особенности поведения минералов, которые наиболее часто играют роль матричных.

#### Поведение матричных минералов в процессах выветривания

К матричным минералам, как явствует из предыдущего изложения материала, мы относим такие компоненты рудного вещества или горных пород, которые служат непосредственной вмещающей средой для россыпеобразующих минералов — золота, олова, платины и алмазов. Перечень этих минералов невелик (табл. 22), однако с интересующей нас точки зрения эти минералы изучены крайне неравномерно. Кроме того, приведенный список может оказаться недостаточным полным, поэтому приводимую ниже характеристику названных в таблице минералов следует рассматривать как приближенную.

Кварц является и матричным, и типичным порообразующим минералом, он занимает совершенно исключительное положение во многих литогенетических и россыпеобразующих процессах. Однако кварц и его поведение в зоне гипергенеза в ряде случаев подвергаются спорным трактовкам, а нередко совершенно необоснованно отождест-

Таблица 22

Матричные минералы россыпеобразующих формаций золота, олова, платины и алмазов

Минерал	Молекулярная масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Растворимость*, мг/л	Твердость	
				по Моосу	абсолютная <sup>2*</sup> , кг/мм <sup>2</sup>
Кварц	60,09	2,65	5-7	7-7,5	1120
Альбит	262,24	2,60	60	6,0	-
Ортоклаз	278,35	2,55	-	6-6,5	795
Хлорит	620,42	2,80	-	2-2,5	-
Мусковит	398,31	2,90	-	2,5	90 <sup>3*</sup>
Флогопит	417,33	3,00	-	2,5	-
Флюорит	78,08	3,18	-	4,0	189
Оlivин	172,25	3,32	-	6,5-7	-
Серпентин	554,16	2,55	-	2,5	-
Пироксен	232,34	3,38	-	5-6	-
Пирит	120,08	5,02	48,89	6,6	925-2056
Пирротин	87,91	4,70	-	3,5-4,5	-
Арсенопирит	162,83	6,16	-	5,5-6	745-1354
Халькопирит	182,31	4,09	-	3,5-4	165-260
Сфалерит	97,25	4,10	6,55	-	161-108
Галенит	239,28	7,60	1,21	2,5	64-110

\*Среднее по литературным данным.

<sup>2\*</sup> По М.М. Хрушеву, С.И. Лебедевой и др.<sup>3\*</sup> Экстраполировано по аналогии с близкими минералами. Прочерки означают отсутствие определенных данных.

вляются с кремнеземом вообще [46, 15], что вызывает справедливую критику [79]. Поэтому вопрос о роли кварца в процессах гипергенеза нуждается в более подробном рассмотрении, чем вопрос о роли остальных матричных минералов.

Кремнезем как химическое соединение и кварц как минерал привлекали внимание еще Д.И. Менделеева, высказавшего в 50-х годах прошлого столетия мысль о полимерности кварца. Позднее эти взгляды были развиты Бутлеровым и Брэггом, разработавшими современную точку зрения на химическую природу кремнезема. По этим представлениям кварц — это полимер  $(\text{SiO}_2)_x$ , в структуре которого атомы кремния находятся в центре тетраэдров с расположенными по углам атомами кислорода. Каждый из атомов кислорода, в свою очередь, связан с двумя атомами кремния. Поэтому, чтобы разрушить кристалл кварца, надо разорвать большое количество связей кремния с кислородом, характеризующихся, как было показано выше, высокой энергией связи.

В геологических процессах могут участвовать три основные разновидности кремнезема: кристаллический кремнезем (собственно кварц), аморфный кремнезем и наиболее часто встречаемая в природных растворах форма — кремнезем, переходящий в коллоидную или ионную форму при химическом разложении кремнийсодержащих минералов. Химическое преобразование кремнезема в природных услови-

ях может состоять в конгруэнтном растворении в соответствии с реакцией [27]



(твердая фаза)

Растворимость кварца в общем случае зависит от pH и температуры среды (рис. 26, *a, б*), однако в условиях земной поверхности (при температуре до +25–30°C) изменяется мало в широком интервале значений pH (рис. 26, *a*) и составляет около  $6,5 \text{ млн}^{-1}$  растворенного кремнезема. Причем кремнезем растворяется в воде, образуя истинный раствор, только до определенной концентрации, которая называется растворимостью аморфного кремнезема [104, с. 198]. По достижении этой концентрации кремнезем обнаруживает тенденцию к полимеризации и образованию коллоидного раствора. Рост растворимости обнаруживается при повышении pH среды выше 8–9. Важно отметить, что в интервале температур 0–50°C растворимость кремнезема меняется в довольно узком интервале, а при охлаждении или изменении pH среды вода пересыщается кремнеземом и он полимеризуется до коллоидной фазы.

Экспериментальные исследования поведения кремнезема в различных физико-химических условиях довольно многочисленны, правда, среди них преобладают работы по изучению состояния кремнезема при высоких температурах и давлениях, не характерных для зоны гипергенеза. Опыты при нормальных температуре и давлении показали, что растворимость кремнезема существенно не менялась при замене пресной воды на морскую. При выяснении растворимости кремнезема в многокомпонентных системах установлено, что любой катион, способный образовывать слаборастворимые силикаты, должен уменьшить растворимость аморфного кремнезема. В частности, присутствие  $\text{Al}^{3+}$  может уменьшить растворимость кремнезема в десятки раз. Хотя в лабораторных условиях процессы осаждения кремнезема наблюдать сложно, однако теоретически кристаллы кварца должны находиться в равновесии с раствором, содержащим несколько частей на миллион [66].

Экспериментальные исследования последних лет не внесли ничего принципиально нового в вопрос о поведении и устойчивости кварца в гипергенных условиях. Б.М. Мицок пришел к выводу, что вследствие своих кристаллохимических особенностей кварц является очень инертным материалом. Этот исследователь также подчеркивает, что низкая растворимость кварца связана с высокой степенью упорядоченности его структуры, в которой однородные связи Si–O–Si являются весьма инертными вследствие предельного использования неподеленных электронных пар атома кислорода [94].

Интересны данные Ж.Педро о поведении кварца в условиях экстремального тропического выветривания. Выветривание гранитов в течение 25 месяцев при весьма жестких значениях pH и температуры привело к образованию выветрелой корочки на обломках гранитов. Установлен также интенсивный вынос кремнезема. Хотя Ж.Педро специально не анализирует, за счет чего гранит теряет кремне-

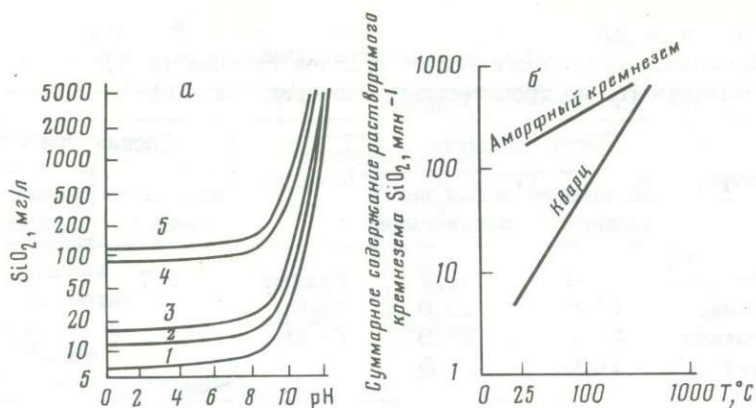


Рис. 26. Изменение растворимости различных форм кремнезема (а) в воде в зависимости от рН при нормальных условиях ( $25^{\circ}\text{C}$ ) и растворимость кремнезема в зависимости от температуры (б) при  $\text{pH} < 7,2$  [27]

1 - кварц; 2 - кристобалит; 3 - тридимит; 4 - кварцевое стекло; 5 - аморфный кремнезем [94]

зем, из его данных со всей очевидностью следует, что идет вынос кремнезема, входящего в молекулы полевых шпатов. Кварц же как минерал совершенно не участвует в миграционном обмене. Об этом свидетельствует минералогический состав гранита в выветрелой зоне до и после опыта (табл. 23).

Приводимый в работе Ж.Педро [111, с. 59] полный баланс продуктов выветривания подтверждает неучастие кварца в гидролизе и активное выщелачивание кремнезема из олигоклаза и ортоклаза. При детальном полевых исследованиях М.А. Глазвской также установлено увеличение содержания кварца в выветрелых корочках гранита на 2-7% [32]. Таким образом, экспериментальные данные не дают никаких оснований для сомнений в очень высокой устойчивости кварца к процессам выветривания. Тем не менее в различных литогенетических построениях бесспорные экспериментальные факты не нашли еще правильного истолкования.

Действительно, выветривание силикатов переводит огромные количества кремнезема в раствор. Однако при оценке этого явления не учитывается, что механизм выноса кремнезема сводится к его мобилизации из силикатных минералов горных пород. При совместном нахождении в той или иной обстановке аморфного кремнезема, кварца и кремнезема силикатов в раствор будут переходить прежде всего аморфные формы кремнезема, а также кремнезем силикатов, вследствие их более высокой растворимости. При этом кварц в силу отмеченной выше его способности находиться в равновесии с раствором, содержащим хотя бы несколько частей на 1 млн. двуокиси кремния, будет устойчив и не начнет растворяться.

Это хорошо согласуется с геологическими данными, однако оце-

Таблица 23

Изменение минералогического состава гранита (в %) в эксперименте по тропическому выветриванию [111]

Минерал	Состав гранита		Минерал	Состав гранита	
	до выветривания	после выветривания		до выветривания	после выветривания
Кварц	29,4	31,9	Рудные	2,7	3,2
Ортоклаз	14,8	12,9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3,6
Олигоклаз	37,1	29,9	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	1,7
Биотит	16,0	17,5			

нивается с различных точек зрения. Н.М. Страхов отмечает, что поскольку в современных речных водах содержание SiO<sub>2</sub> находится на уровне 10–20 мг/л, а в морских – 0,5–2(3) мг/л, то следует считать твердо установленным, что кремнезем в современных поверхностных водах повсеместно присутствует в форме резко ненасыщенного раствора [160], А.П. Лисицын полагает, что поступление растворенного и взвешенного кремнезема зависит от скорости процессов выветривания. Причем наиболее интенсивно процесс выноса кремнезема идет в гумидной тропической зоне, "где процессы выветривания захватывают не только все силикаты и алюмосиликаты, но и наиболее стойкую форму кремнезема – кварц, который также переходит в растворы" [77, с. 94]. Однако это утверждение представляется весьма сомнительным, так как без анализа форм переноса кремнезема реками гумидной тропической зоны совершенно невозможно обосновать мнение о том, что повышенное содержание кремнезема в водах рек этой зоны обусловлено переходом в раствор кварца. На это обстоятельство указывают данные, приведенные и в работе А.П. Лисицына (табл. 24).

Из приводимых данных следует, что если в среде выветривания одновременно присутствует ряд силикатных минералов, то кварц, обладая растворимостью в 2–4 раза меньшей, чем кремнезем силикатов, будет запаздывать по отношению к растворению силикатов вмещающих пород. Очевидно, что кварц будет находиться в равновесии со средой, пока в ней остается хотя бы незначительное количество двуокиси кремния.

Р.Гаррелс и Ф.Маккензи отмечают, что средняя концентрация растворенного кремнезема в речных водах земного шара (13 млн<sup>-1</sup>) вдвое превышает растворимость кварца при температурах, характерных для земной поверхности, и составляет лишь одну десятую растворимости аморфного кремнезема. Эти авторы справедливо подчеркивают, что низкая реакционная способность кварца в лабораторных условиях, а также обычно наблюдаемое пересыщение речных вод по отношению к кварцу позволяют считать этот минерал химически почти инертным в условиях поверхности Земли. Поэтому, чтобы объяс-

Таблица 24

Растворимость кремния различных минералов [77, с. 95]

Минерал	Растворимость, ч.н.млн.	
	в дистиллированной воде (рН 6,5-8,9)	в воде с CO <sub>2</sub> (рН 5,1-6,9)
Кварц	3,5	4,0
Оливин	6,0	13,6
Энстатит	16,5	17,4
Диопсид	23,3	11,5
Авгит *	17,7	11,0
Роговая обманка	5,0	9,0
Лабрадорит	3,8	7,5
Микроклин	7,4	6,2
Нефелин	14,8	12,4
Биотит	7,3	9,0

нить присутствие в реках растворенного кремнезема, следует рассмотреть другие силикатные минералы [27, с. 121-122]. Таким образом, никакого недонасыщения речных вод кремнеземом установить не удастся. В действительности кремнезем имеет тот предельно высокий уровень концентрации, который диктуется геохимическими условиями его нахождения в водной среде вместе с другими компонентами ионного стока. Приводимые А.П. Лисицким [77, с. 160], Р.Гаррелсом и Ф.Маккензи [27, с. 90] данные о составе взвесей рек говорят о том, что обычный фоновый состав терригенных и интрузивных пород, преобладающих на водосборных площадях, дает фоновый состав взвесей, которые осаждаются в конечных водоемах стока (с поправкой на биогенные процессы). Иначе говоря, в системе континент - океан осуществляется естественный баланс химических и минеральных компонентов. Причем кварц переносится преимущественно в терригенной форме. Нельзя не напомнить в этой связи слова самого Н.М. Страхова о том, что, чем менее растворимо соединение, тем большую роль в транспортировке его реками играет механический перенос, и наоборот [161, с. 369]. Представление об истинной растворимости кварца в речных водах дают данные о составе вод, дренирующих почти чисто кварцевые породы хребта Сангре де Кристо, Нью-Мехико (в ч.н.млн.) [27]:

$\text{HCO}_3^-$	$\text{SiO}_2$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{SO}_4$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$
5,7	3,6	1,9	1,8	0,5	0,3	0,1	~0,06	~0,06

Судя по этим данным, содержание кремнезема ниже растворимости кварца. Однако и в этом случае большая часть этого кремнезема своим происхождением обязана ничтожным примесям полевых шпа-

тов, а не кварцу. Иначе нельзя найти, как справедливо замечают авторы, соответствующий источник калия и натрия в водах.

Следовательно, в процессах денудации кварц ведет себя в полном соответствии с теоретическими и экспериментальными данными об инертности этого минерала. Если коснуться материалов о процессах мобилизации терригенного материала, формирования кор выветривания, почв, то мы найдем и здесь полное подтверждение изложенным выше представлениям.

Кварц в условиях тропического выветривания оказывается настолько инертным, что не только сам не подвергается значительному химическому изменению, но и оказывает ингибиторное действие, угнетая процесс формирования нормального профиля коры выветривания. В.М. Сеницын указывает, что гранитоиды вследствие обилия кварца, затрудняющего разложение каолинита, не дают хорошо развитой латеритной коры выветривания. Латеритная кора выветривания в том или ином виде образуется на основе различных алломосиликатных пород, но хорошо развитый ферралитный горизонт встречается только на бескварцевых породах [146]. Кварц повсеместно встречается в почвенных горизонтах тропических ландшафтов [36], в древних корах выветривания [91] и является главнейшим минеральным компонентом древних россыпей различного генезиса [38].

Вместе с тем имеются указания, что в мелких зернах кварц нередко несет следы коррозии [144, 78]. Это дает повод для противоречивых суждений по вопросу об устойчивости кварца. Г.И. Бушинский [15] отмечает, что в закрытых системах и близких к нейтральной среде гидролиз затруднен и силикаты остаются почти без изменения, так как отдают часть своих компонентов в раствор, достигают с ним равновесия и далее не разлагаются. Например, для устойчивости полевого шпата с водой достаточно содержания в ней  $\text{SiO}_2$  в количестве 10–40 мг/л. Поскольку такие концентрации имеются почти везде в грунтовых, речных и морских водах, то разложение в них силикатов не происходит или весьма ограничено.

Эти замечания Г.И. Бушинского вполне согласуются с приведенными выше данными. Но далее этот исследователь утверждает, что в гумидных условиях благодаря притоку огромных масс маломинерализованных бескремнистых дождевых вод силикаты, включая и кварц, легко гидролизуются. Н.В. Логвиненко, касаясь представлений Г.И. Бушинского, считает, что он делает ошибку, не различая кремнезем силикатов и алломосиликатов и кремнезем, кварца, так как  $\text{SiO}_2$  силикатов и алломосиликатов обладает подвижностью и в зависимости от условий разной и даже большей, а  $\text{SiO}_2$  кварца не обладает такой подвижностью [79, с. 147].

Проанализировав весьма многочисленные материалы и результаты исследований, авторов которых просто невозможно здесь перечислить, мы пришли к выводу, что высказываемые иногда представления о растворимости кварца опираются на немногочисленные проявления этого процесса, природа которого не всегда достаточно выяс-

нена. Г.Г. Леммлейн показал, что коррозия и регенерация кварцевых вкрапленников — нередкое явление, характерное для эндогенной стадии формирования горных пород. Поэтому при интерпретации признаков корродированности кварцевых зерен необходимо приводить убедительные доказательства их вторичной природы. Кроме того, нельзя исключать и тот факт, что в древних корках выветривания могут существовать условия для вторичной гидротермальной деятельности и регенерации зерен кварца в тех проявлениях, на которые указывает Г.Г. Леммлейн [75].

Следовательно, даже допуская коррозию или регенерацию зерен кварца в гипергенных условиях, надо признать, что это ничтожный по своей геологической роли процесс и что его никак нельзя связать с высвобождением россыпеобразующих минералов при выветривании рудных тел. В этом отношении уместно сослаться на вывод С.С. Смирнова о том, что в зонах окисления сульфидных месторождений кварц ведет себя как один из наиболее устойчивых минералов [152]. В.П. Петров к числу достоверно установленных положений учения о корках выветривания отнес вывод о том, что в коре выветривания сохраняются кварцевые жилы [114].

Итак, разнообразные экспериментальные данные и геологические материалы свидетельствуют о ничтожно малой подверженности кварца тем или иным химическим преобразованиям. Как в зонах мобилизации, так и на участках транспорта и седиментаций энергетически наиболее предпочтительной формой нахождения этого минерала и его участия в денудационном процессе является дисперсная форма. Даже условия тропиков не влияют существенно на поведение кварца. Причина этого несколько парадоксального факта заключена в геохимическом запрете, накладываемом на разрушение кристаллической структуры кварца, в виду более легкого поступления в грунтовые воды кремнезема остальных породообразующих силикатов. Химическое разрушение кварца может в той или иной степени начаться лишь после того, как будут вынесены все остальные, более подвижные формы кремнезема и среда осадконакопления окажется ненасыщенной по отношению к кристаллическому кремнезему (кварцу). Но и в этом случае скорость химического разложения кварца будет диктоваться, несомненно, его способностью к растворению.

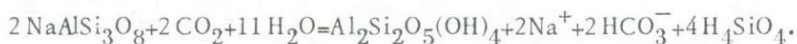
В преломлении к проблеме выветривания коренных источников и высвобождения россыпеобразующих минералов повышенная устойчивость кварца весьма важна. Если ряд россыпеобразующих формаций рассматривать от наиболее кварцевых к наименее кварцевым, как это было сделано выше, то нетрудно прийти к заключению, что существенно кварцевые руды должны себя вести резко отлично от малокварцевых или бескварцевых. Именно этот вывод полностью подтверждается особенностями остальных матричных минералов, а также экспериментальными данными.

Альбит относится к группе полевых шпатов (подгруппа плагиоклазов), является наиболее кислым из плагиоклазов и имеет относительно большое содержание  $\text{SiO}_2$ . Химический состав этого мине-

рала отражает значительные вариации в содержаниях калия и натрия, а также включает небольшие количества других 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>	FeO	MnO
66,22	0,01	21,25	0,09	0,07	—
CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
1,60	0,04	9,50	0,60	—	

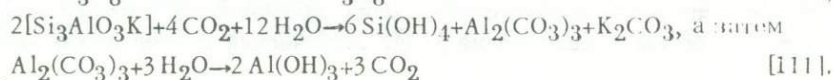
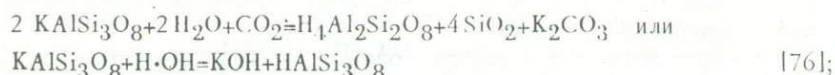
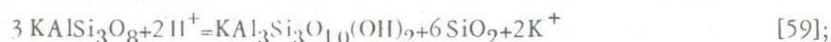
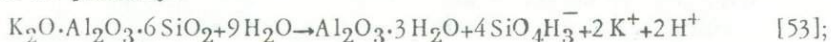
В качестве матричного минерала альбит развит в месторождениях касситеритовых формаций, иногда занимая значительное место в составе рудных тел оловорудных месторождений [182, 82]. В процессах выветривания альбит проявляет себя как довольно устойчивый минерал, однако при длительном нахождении в гипергенных условиях переходит в серицит или мусковит. Одни исследователи полагают, что каолинизация плагиоклазов — процесс редкий, но другие считают каолинит главным продуктом изменения алюмосиликатов (альбита, в частности) по схеме [27]



Ортоклаз принадлежит к категории наиболее устойчивых к выветриванию полевых шпатов. Химический состав ортоклаза близок к альбиту, отличаясь более высоким содержанием калия:

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO
66,06	0,014	18,89	0,042	0,036
CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
0,035	0,036	3,20	11,40	

Ортоклаз — один из наиболее обычных минералов оловорудных месторождений. Его непосредственные сростания с касситеритом развиты не так широко, как сростания кварца и касситерита. Нередко ортоклаз наряду с альбитом образует многочисленные прожилки в кварцевых телах, являясь продуктом альбитизации и ортоклазизации рудных тел в позднюю фазу формирования оловянной минерализации. Поэтому для ортоклаза более характерны соотношения третьего типа (см. рис. 31). В процессах выветривания ортоклаз заметно уступает по устойчивости кварцу, однако наряду с ним способен накапливаться в продуктах размыва и переотложения кор выветривания. Реакции гидролиза ортоклаза различные исследователи представляют себе по-разному:



Несмотря на различное написание, смысл приведенных соотношений один: вымывание калия из кристаллической решетки ортоклаза под воздействием гидроксильных групп инфильтрующихся вод и постепенный распад минерала до более простых и устойчивых в зоне гипергенеза соединений.

Хлорит — один из характерных матричных минералов оловорудных месторождений касситерит-силикатной формации. Химический состав этого минерала, по А.А. Кухаренко [71], определяется изоморфной смесимостью двух компонентов — антигорита  $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$  и амезита  $Mg_4Al_2[Al_2Si_2O_{10}](OH)_8$ . Усложнения в состав минералов этого ряда вносит замещение  $Mg^{+2}$  на  $Fe^{+2}$  и реже  $Al^{+3}$  на  $Fe^{+3}$  [71]. Химический состав хлорита, развивающегося по флогопиту в кимберлитах [1], имеет вид (в вес. %):  $SiO_2 - 30,48$ ;  $TiO_2 - 0,32$ ;  $Al_2O_3 - 8,42$ ;  $Fe_2O_3 - 7,31$ ;  $Cr_2O_3 - 0,26$ ;  $FeO - 6,81$ ;  $MnO - 0,06$ ;  $NiO - 0,13$ ;  $MgO - 25,18$ ;  $CaO - 3,70$ ;  $(K_2O + Na_2O) - 0,30$ ;  $H_2O (+105^\circ) - 1,24$ ;  $H_2O - 11,13$ ;  $CO_2 - 4,83$ ;  $P_2O_5$  — следы.

Вследствие своего химического состава хлорит может существовать в зоне гипергенеза в широком диапазоне условий в качестве как вторичного минерала по биотиту, флогопиту и другим минералам, так и новообразованного минерала. Принципиальная схема разрушения хлоритов при выветривании состоит в потере части щелочей и железа, переходе двухвалентного железа в трехвалентное и постепенном распаде до окислов железа, кремния и алюминия. Имеющиеся данные позволяют говорить о том, что в качестве матричного минерала хлорит способствует быстрому разрушению коренных источников олова под действием как физического, так и химического выветривания. Он слабо противостоит также механическому воздействию вследствие малой твердости и листоватой структуры.

Мусковит является довольно обычным минералом рудных тел россыпьеобразующих формаций золота и олова. Наибольшее значение в качестве матричного минерала мусковит имеет в месторождениях касситерит-кварцевой формации, принимая участие в формировании мусковито-кварцевых рудопроявлений касситерита [182]. Данные о химическом составе мусковита из гранитов Северо-Востока СССР, близком к среднему составу этого минерала по П.Н. Чирвинскому, приводят А.П. Соболев и П.П. Колесниченко [153] (в вес. %):  $SiO_2 - 45,80$ ;  $TiO_2$  — не обнаружен;  $Al_2O_3 - 36,0$ ;  $Fe_2O_3 - 0,79$ ;  $FeO - 1,62$ ;  $MnO - 0,14$ ;  $MgO - 0,33$ ;  $CaO$  — не обнаружен;  $Na_2O - 0,92$ ;  $K_2O - 9,70$ ;  $Rb_2O - 0,015$ ;  $Li_2O$  — не обнаружен;  $F - 0,64$ ;  $H_2O - 4,57$ ; сумма — 100,25.

В процессах выветривания мусковит сравнительно устойчивый в группе слюд минерал. Изменение при химическом выветривании начинается сорбцией воды в структуру минерала, затем происходит вынос калия и замещение его оксидом [53]. Не касаясь особенностей химического состава, отметим, что другие минералы группы слюд, часто встречающиеся в рудных телах и продуктивных горных породах (флогопит, биотит, лепидолит и их разновидности), обладают сходным с мусковитом поведением в процессах выветривания. Они легко гидратируются, расщепляются на тонкие чешуйки и листочки и в целом

не оказывают влияния на устойчивость рудного вещества к процессам физического и химического выветривания.

Флюорит весьма широко представлен в рудных телах оловоносных россыпеобразующих формаций. В.П. Батурин [5] считал флюорит одним из устойчивых к химическому воздействию минералов. Об этом же свидетельствуют данные о способности флюорита формировать элювиальные россыпи в виде скопления флюоритовых агрегатов и мелких зерен в коре выветривания каолинового состава [14]. Вследствие низкой механической прочности и высокой спайности флюорит легко разрушается процессами физического выветривания. Поэтому, оценивая его роль в качестве матричного минерала, следует полагать, что он в сравнительно малой степени способствует устойчивости рудных тел к выветриванию. Обладая хорошей проницаемостью вследствие совершенной спайности, флюорит не препятствует проникновению жидкой фазы к кристаллической решетке менее устойчивых минералов, с которыми агрегирует флюорит, и их химическому преобразованию.

Оливин принадлежит к матричным минералам россыпеобразующих формаций платины и алмазов. Химический состав оливина отличается сравнительным постоянством, и в этом отношении оливины из кимберлитов Якутии и Южной Африки оказываются практически идентичными. Типичный химический состав оливина [1] имеет следующий вид (в вес. %):  $\text{SiO}_2$  — 40,74;  $\text{TiO}_2$  — не установлен;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 0,06;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  — 0,019;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 0,38;  $\text{FeO}$  — 7,45;  $\text{MnO}$  — 0,11;  $\text{NiO}$  — 0,32;  $\text{CoO}$  — 0,009;  $\text{CaO}$  — 0,13;  $\text{MgO}$  — 50,46;  $\text{H}_2\text{O} (+105^\circ)$  — 0,23; П.п.п. — не установлено; сумма — 99,91.

По мнению большинства исследователей, оливин является одним из малоустойчивых минералов. Отмечается, что изменение оливина происходит раньше, чем порода попадает в зону гипергенеза по схеме [71]:  $2(2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2)+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{MgO}\cdot 2\text{H}_2\text{O}+3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Для железосодержащего оливина Ж.Педро [111] предлагает иную схему преобразования:  $[\text{MgFeSiO}_4]+2\text{CO}_2+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{Si}(\text{OH})_4+\text{FeCO}_2+\text{MgCO}_3$ .

Р.Гаррелс и Ф.Маккензи [27] полагают, что химическое выветривание оливина соответствует реакции  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4+4\text{CO}_2+4\text{H}_2\text{O} = 2\text{Mg}^{2+}+4\text{HCO}_3^-+\text{H}_4\text{SiO}_4$ . При этом ионы  $\text{H}^+$ , возникающие за счет  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , соединяются с кремнекислородным радикалом и образуют кремневую кислоту  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ . Таким образом, мы рассмотрели некоторые из характерных породообразующих минералов россыпеобразующих формаций. Серпентин и пироксены, а также некоторые другие силикаты, являющиеся матричными минералами, ведут себя в процессах выветривания подобно рассмотренным выше. При этом многочисленными экспериментальными исследованиями и полевыми наблюдениями установлено, что принципиальный ряд устойчивости минералов (рис. 27) соответствует их поведению в зоне гипергенеза.

Суммируя изложенное выше о роли силикатов в качестве матричных минералов, следует отметить несколько особенностей их поведения в зонах окисления рудных месторождений в отличие от кор выветривания. Одно из наиболее существенных отличий состоит в

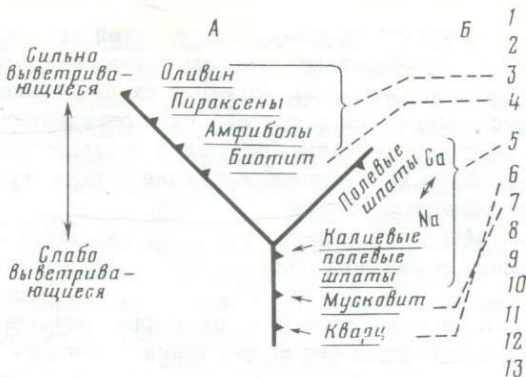


Рис. 27. Ряды устойчивости минералов в гипергенных условиях в дисперсном состоянии [11]

А — для фракции 1–0,01 мм; Б — для фракции мельче 0,01 мм; 1 — гипс, галит; 2 — кальцит, апатит; 3 — оливин, пироксены; 4 — биотит, глауконит; 5 — альбит, анортит, вулканическое стекло; 6 — кварц, кристобалит; 7 — мусковит, серицит; 8 — вермикулит; 9 — монтмориллонит; 10 — каолинит, галлуазит, аллофан; 11 — гиббсит, бемит; 12 — гематит, гетит; 13 — анатаз, рутил, циркон

том, что коры выветривания формируются на горных породах сравнительно однородного сложения. Породообразующие минералы образуют массу породы в виде зернистых агрегатов, равномерно распределенных в веществе породы в соответствии с ее петрографическими и текстурно-структурными особенностями. В рудных телах матричные минералы образуют мономинеральные обособления, выполяют трещины, разнообразные пустоты или целиком слагают рудное тело в виде жил, штоткверковых систем, зон метасоматоза и т.п. В этом случае жидкая фаза инфильтрационных вод взаимодействует с веществом матричного минерала не в виде его единичных зерен, а в виде скопления кристаллов одного и того же минерала. Это затрудняет процессы ионного обмена, поскольку жидкая фаза быстро насыщается выносимыми компонентами и процесс разложения породообразующего матричного минерала замедляется.

С другой стороны, Р. Гаррелс и Ф. Маккензи обращают внимание на то обстоятельство, что в природных условиях катионный состав силикатов гораздо разнообразнее, чем отмечено для отдельных (типичных) минералов. Катионы поступают в растворы с разными скоростями, и поверхность силикатных минералов окутывается защитной пленкой частично гидратированного минерального слоя. Дальнейшая реакция замедляется, так как ионы должны диффундировать сквозь защитный поверхностный слой [27].

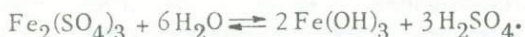
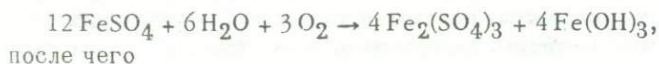
Наконец третьим, весьма важным свойством рудных тел россыпеобразующих формаций (по меньшей мере значительной их части) является присутствие, иногда весьма значительное, сульфидных минералов.

В силу охарактеризованных выше особенностей кристаллохимического строения сульфиды обладают в целом невысокой устойчивостью в атмосфере свободного кислорода. Поэтому их поведение, особенно в случае высокого содержания в составе руд, определяет поведение рудного тела, а иногда и россыпеобразующей формации в целом в процессах выветривания и россыпеобразования. Рассмотрим кратко наиболее распространенные сульфидные минералы.

Для оценки устойчивости сульфидов в зоне гипергенеза используется ряд Шюрмана — ряд убывания сродства халькофильных элементов к сере: Hg, Ag, Cu, Bi, Pb, Zn, Ni, Co, Fe. Однако Л.В. Яхонтова и А.П. Грудев считают этот ряд чрезмерно схематичным, полагая, что попытка построить ряды возрастания (убывания) стойкости рудных минералов в зоне окисления практически оказалась невозможной [222, с. 75]. Эти исследователи находят наиболее рациональным ранжирование сульфидов для некоторых случаев их поведения по электродным потенциалам. В этом случае ряд устойчивости условно можно представить таким образом: пирит — кобальтин — арсенопирит — галенит — сфалерит. Разрушение сульфидов при выветривании, по Л.В. Яхонтовой и А.П. Грудеву, происходит механическим путем с помощью окислительно-восстановительных реакций и растворения. Механическое разрушение эти авторы связывают с охарактеризованными выше факторами физического выветривания. Главнейшим химическим механизмом разрушения сульфидов считаются окислительно-восстановительные реакции. Причем окисление (восстановление) хотя бы одного из компонентов первичного минерала приводит к выводу этого компонента из структуры, т.е. к разрушению последней [222, с. 161].

Процесс окисления сульфидов означает переход электронов от окисляющегося элемента к атому кислорода. В отношении проводящих рудных минералов этот процесс приобретает черты самопроизвольной электрохимической коррозии, что резко увеличивает скорость окисления. Меньшее значение имеют реакции растворения сульфидов в грунтовых водах, поскольку сами по себе сульфидные минералы отличаются низкой растворимостью [152].

Типичные реакции окисления сульфидов хорошо известны. В частности, пирит преобразуется при выветривании по схеме



По аналогичной схеме происходит окисление и остальных сульфидных минералов [152].

Подведем некоторые итоги нашему рассмотрению особенностей поведения матричных минералов россыпеобразующих формаций. Матричные минералы распадаются на две большие группы — минералы класса силикатов и класса сульфидов. В группе силикатов наиболее

устойчивым матричным минералом является кварц, а наименее устойчивыми — оливин и пироксены. В свою очередь, и среди сульфидов можно было бы выделить ряд устойчивости, в большей или меньшей мере характеризующий последовательность разрушения минералов при выветривании. Однако, оценивая роль различных групп матричных минералов в регулировании процесса россыпеобразования, т.е. прежде всего выветривания рудного вещества, необходимо найти соизмеримые критерии устойчивости отдельных минералов и таких крупных категорий структурной организации рудного вещества, как россыпеобразующая формация. Анализ процессов формирования зон окисления в масштабе геологического времени приводит к выводу, что влиянием различной устойчивости тех или иных сульфидных минералов можно пренебречь. Действительно, если пирит несколько более устойчив, чем, например, халькопирит, то это вовсе не означает, что пирит будет сохраняться в процессах выветривания, а халькопирит — разрушаться. Их индивидуальные различия в устойчивости полностью нивелируются за время формирования зоны окисления. С другой стороны, различия между устойчивостью кварца, например, и оливина таковы, что кварц будет сохраняться в коре выветривания, а оливин полностью разрушится в начальной стадии ее формирования.

В настоящее время уровень изученности минерального состава россыпеобразующих формаций не позволяет оценить степень их способности к выветриванию и высвобождению россыпеобразующих минералов, только опираясь на усредненные данные об их химическом и минеральном составе. Необходимы дополнительные критерии, которые подтверждали бы вырисовывающуюся закономерность: наиболее устойчивы рудные тела тех формаций, в минеральном парагенезисе которых преобладают устойчивые минералы. Для получения таких дополнительных критериев были поставлены опыты по моделированию выветривания рудного вещества.

#### Моделирование химического выветривания

Автор наиболее обстоятельной работы по экспериментальному выветриванию Ж.Педро не без оснований заметил, что в течение длительного времени изучение процесса выветривания базировалось на наблюдении природных явлений. Поэтому представление об отдельных фазах развития процесса основывалось на изучении объектов, в которых этот процесс был уже завершен: почвы, коры выветривания [111, с. 11]. Аналогичная или еще более затруднительная ситуация наблюдается в геологии россыпей, когда мы вынуждены экстраполировать начальные стадии формирования россыпей в геологическую ретроспективу, сознавая при этом, что те участки и горизонты рудных тел, которые дали россыпь, полностью уничтожены эрозией и денудацией. При таких обстоятельствах лабораторный эксперимент становится единственным достоверным источником информации о физико-химических процессах и геологических явлениях, которые происходят при выветривании рудного тела.

Приступая к планированию экспериментального изучения химического выветривания, мы должны были преодолеть несколько затруднений. Первой методической трудностью была необходимость получения таких данных о химическом выветривании, которые позволяли бы сравнить этот процесс в количественном и качественном отношении с физическим выветриванием. Второй важной задачей было определение того временного коэффициента, в соответствии с которым можно было оценивать, хотя бы ориентировочно, продолжительность экспериментального процесса в реальном масштабе. По сравнению с физическим выветриванием, где удобной единицей времени для перевода лабораторного процесса в натуральный масштаб времени служит один цикл перехода температуры через  $0^{\circ}\text{C}$ , при химическом выветривании необходимо учитывать температуру среды, ее окислительный потенциал, количество влаги и т.д. Наконец, немаловажным фактором при выборе методики являлась экспрессность эксперимента, возможность менять при необходимости его направленность. Определенное значение имела также себестоимость экспериментов, снижение которой достигалось автоматизацией отдельных стадий опытов и контроля за их ходом, а также ограничением необходимого числа химических и других анализов для оценки результатов экспериментов.

С учетом этих соображений наиболее рациональной оказалась методика моделирования химического выветривания, применявшаяся Ж.Педро, которая и взята нами за основу. Достоинством этой методики [111] было использование для исследования не порошков руд или горных пород, а обломков щебневой размерности, что хотя и удлиняет затраты времени, но дает несравненно более надежные результаты.

Главным отличием наших опытов от экспериментов Ж.Педро было использование рудного материала, а не горных пород, однако последние также вводились в эксперимент для суждения о поведении основных типов рудовмещающих пород в процессах выветривания, а также для сравнения наших данных с результатами Ж.Педро. Существенной особенностью наших опытов было также то, что в соответствии с нашей главной задачей — оценкой россыпеобразующих способностей различных рудных формаций — в первую очередь нас интересовал валовой вынос вещества из выветривающегося материала. По величине выноса можно судить о динамике выветривания во времени и сопоставлять по этому показателю все россыпеобразующие формации. В ходе экспериментов выяснилось, что, помимо растворенных продуктов, в процессе выветривания образуется значительное количество дисперсного материала. В природных условиях такой материал является миграционноспособным и может удаляться из дренируемого поверхностными водами рудного тела. Поэтому одним из важных показателей выветривания является соотношение жидкой и твердой фаз в продуктах выноса.

Основная серия опытов поставлена с использованием экстрактора "Соклет" и уксуснокислой среды при  $\text{pH} = 2,5$ . Значение  $\text{pH}$  принималось с учетом данных об экстремальных условиях кислотности

природных сред [2], а также на основании результатов, полученных уже в ходе опытов и свидетельствующих о том, что при таком значении рН происходит наиболее интенсивный вынос продуктов выветривания. Большие затруднения при постановке опытов и интерпретации результатов связаны с решением вопроса о скорости выветривания в лаборатории при отнесении ее к природному процессу. Ж. Педро эта задача не была решена, к тому же в проведенных им опытах наибольший интерес вызывает качественная картина процесса выветривания. Для целей наших исследований было важно получить хотя бы приближенные количественные данные об интенсивности выноса материала при выветривании, оцениваемой по абсолютной потере массы выветривающегося вещества. Основой для перевода экспериментальных данных в реальный масштаб времени служили измеренные параметры процесса в экстракторе "Сокслет" в сравнении с фактическими климатическими условиями различных климатических зон Земли.

В рабочем цилиндре прибора температура конденсата, инфильтрующего через слой рудного материала, равнялась 65–75°C. В условиях опыта дренаж раствора через исследуемый материал осуществлялся в течение 156 ч непрерывно. В природе нет таких районов с непрерывным выпадением осадков. Правда, есть районы, в которых не наблюдается чередования сухих и влажных сезонов и дожди выпадают в течение всего года (например, острова Полинезии), но даже в этом случае продолжительность выпадения осадков не превышает 240 дней в течение года. Обычно осадки выпадают в течение нескольких часов в сутки, поэтому чистое время непрерывного выпадения осадков за год составляет всего 5% от продолжительности года.

В природных условиях не все количество выпавшей влаги просачивается в почву. Величина дренируемой влаги (Д) всегда меньше количества выпавших осадков (Р) на величину испарения (Е):

$$D = P - E. \quad (7)$$

Общий объем осадков, дренирующих через рабочий цилиндр прибора, определялся опытным путем — многократными замерами количества заполнений цилиндра с рудным материалом. Исходя из средней наполняемости рабочего цилиндра с экспериментальным материалом в 182,5 см<sup>3</sup>, общий объем дренажа за 156 час составлял 22764 см<sup>3</sup>. Перевод этого количества инфильтрата в количество осадков для сопоставления с величиной дренажа в природных условиях выполнялся по методике, принятой в метеорологии для обработки наблюдений. Указанный объем осадков соответствует 13713 мм. Сопоставляя величину этого слоя с количеством осадков в различных пунктах, можно получить данные о продолжительности экспериментального процесса в реальном масштабе времени.

Вычисленный таким образом коэффициент акселерации экспериментального процесса по сравнению с природным только по количеству инфильтрирующей через материал жидкости (Кдр.) отражает лишь различия в количестве осадков на модели и в природе. Однако известно,

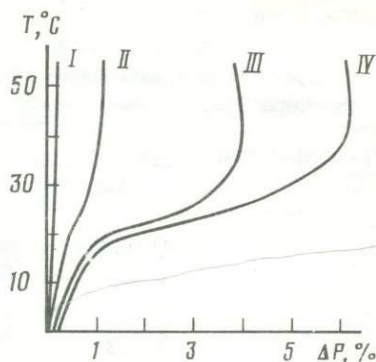
что на скорость химических процессов значительное влияние оказывает температура в зоне реакции. Анализируя этот вопрос, мы столкнулись с определенными затруднениями, поскольку достоверных данных о зависимости скорости реакций от температуры для гетерогенных систем нет. Ж.Педро, в частности, ограничивается довольно общими указаниями на ускорение миграции отдельных компонентов. С одной стороны, этот исследователь допускает, что "увеличение степени извлечения  $\text{SiO}_2$  из породы с повышением температуры, как, впрочем, и всех остальных катионов, определяется, очевидно, законом Вант-Гоффа - Аррениуса". И далее: "Экспериментальное исследование подтвердило предположение, что при увеличении температуры от 20 до 70°C вынос кремнезема возрастает в 4 раза" [111, с. 159]. Однако, если за основу расчета принять правило Вант-Гоффа об увеличении скорости реакций не менее чем в 2 раза при росте температуры на каждые 10°C, то вынос кремнезема должен был возрасти в опыте Ж.Педро не в 4 раза, а в 32 раза! Это несоответствие косвенно признает и сам Ж.Педро, отмечая, что "такое увеличение выноса  $\text{SiO}_2$  с повышением температуры не оказывало столь решающего влияния на ионный состав фильтрата, как это можно было бы ожидать. Было установлено, что в фильтратах отношение  $\text{SiO}_2$ /основания при этом почти не изменялось, а сравнение величин отношений  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  показало, что при понижении температуры от 70 до 20°C происходило относительное увеличение выноса  $\text{SiO}_2$  в 9,3 раза, что является уже значительной величиной. Что касается содержания  $\text{SiO}_2$  в фильтратах выветривания, то с понижением температуры оно возрастало от 57,7 до 68%" [111, с. 159-160]. Из этих данных следует, что понижение температуры реакции приводит к более значительному росту выноса кремнезема, нежели ее повышение. Очевидная нечеткость и отчасти противоречивость полученных Ж.Педро данных свидетельствуют лишь о наличии ограничений, накладываемых гетерогенностью физико-химической системы на соответствие протекающих в ней реакций правилу Вант-Гоффа.

Для получения хотя бы относительно достоверных данных о влиянии температуры на валовой вынос вещества из выветривающегося рудного материала поставлен опыт по термостатированной экстракции продуктов выветривания в зависимости от изменения температуры. Выяснилось, что эта зависимость носит сложный характер. Наиболее резко ускоряется реакция выноса при увеличении температуры от 0 до 10 и затем до 30°C (рис. 28), после чего она замедляется, и в интервале значений 40-50°C приращение скорости выноса не наблюдается. Напротив, намечается тенденция уменьшения интенсивности выноса. Очевидно, это связано с отмечавшейся выше кинетикой химического выветривания силикатов: быстрое образование защитной пленки и затухание процесса выноса по мере утолщения этого защитного слоя. При этом часть микротрещин зашлаковывается дисперсными продуктами выветривания, что также затрудняет доступ жидкой фазы к свежим, неизменным ячейкам кристаллической структуры минералов. В этой связи важно отметить особенности химического выветривания материала различной крупности. Оказалось, что,

118

Рис. 28. Графики зависимости интенсивности выноса продуктов химического выветривания от температуры среды

I - фракция 40-10 мм; II - фракция 10-5 мм; III - фракция 5-1 мм; IV - фракция 1-0,5 мм. По оси абсцисс - величина потерь массы выветривающихся пород, по оси ординат - температура среды



как и при физическом выветривании, оптимальная скорость процесса достигается при взаимодействии реакционной жидкости фазы с материалом определенной размерности (табл. 25). Следовательно, для химического выветривания важное значение имеет не только температура, но и кинетика проникновения реакционноспособной среды к атомно-ионной структуре минералов.

Подсчеты коэффициента ускорения выветривания в зависимости от увеличения температуры на каждые 10°C (табл. 26) позволяют ввести соответствующую поправку при сопоставлении лабораторного процесса и природного.

Хотя приведенные в табл. 25 данные дают представление о характере зависимости между выветриванием и температурой (см. также рис. 28), этот вопрос требует дальнейшего изучения. Результаты получены только для гипербазитов, которые использованы в связи с тем, что они обеспечивают в процессе опыта заметную величину выноса и что результаты легко регистрировать по изменению массы выветривающегося материала. Существенно кварцевые руды и породы в условиях аналогичного эксперимента дали значения выноса из образцов, соизмеримые с точностью взвешивания, поэтому судить об истинных значениях выноса нельзя. В связи с этими ограничениями полученные данные об ускоряющем влиянии температуры на процессы выветривания необходимо использовать с большой осторожностью и только для ориентировочных подсчетов.

Для оценки влияния pH среды на ускорение выветривания по сравнению с природными средами поставлена специальная серия опытов с использованием гранодиоритов. Полученные данные (табл. 27) свидетельствуют о вполне закономерном уменьшении темпа выноса материала при уменьшении кислотности среды. Таким образом, для соотношения скорости лабораторного выветривания с природным процессом можно использовать, с той или иной степенью достоверности, коэффициенты ускорения реакции в эксперименте по величине дренажа, температуре и режиму кислотности. Нами не учитывалось только давление паров насыщения, которое в рабочем цилиндре также было выше, чем в природных условиях. На данной стадии исследований нам не удалось установить значение этого фактора, однако на основании

Таблица 25

Величина выноса (в г/%) продуктов химического выветривания гипербазитов в зависимости от крупности частиц (мм) и температуры среды

Температура, °C	Фракция, мм			
	40-10	10-5	5-1	мельче 0,5
20	$\frac{0,4124}{0,11}$	$\frac{0,9157}{0,40}$	$\frac{0,7432}{1,50}$	$\frac{0,8054}{1,14}$
25	$\frac{0,4873}{0,13}$	$\frac{1,5518}{0,68}$	$\frac{2,2652}{4,51}$	$\frac{2,3301}{3,30}$
30	$\frac{0,2542}{0,07}$	$\frac{1,8779}{0,83}$	$\frac{1,9712}{3,99}$	$\frac{2,3318}{3,30}$
35	$\frac{0,4676}{0,13}$	$\frac{2,2174}{0,98}$	$\frac{2,8534}{5,77}$	$\frac{2,7563}{3,90}$
40	$\frac{0,5144}{0,14}$	$\frac{2,3119}{1,02}$	$\frac{3,0712}{6,22}$	$\frac{2,7563}{3,90}$
45	$\frac{0,7008}{0,21}$	$\frac{2,5591}{1,17}$	$\frac{3,0687}{6,20}$	$\frac{2,8144}{3,87}$
Сумма	$\frac{3,5950}{0,98}$	$\frac{14,0914}{6,21}$	$\frac{17,0367}{34,40}$	$\frac{16,5199}{23,38}$
Среднее	$\frac{0,5136}{0,14}$	$\frac{2,0131}{0,89}$	$\frac{2,4338}{4,91}$	$\frac{2,3600}{3,34}$

сравнения результатов выветривания в открытой и закрытой системе можно полагать, что величина давления паров раствора незначительна по сравнению с непосредственным контактом жидкой фазы с выветривающимися минералами. Поэтому мы сочли пока возможным пренебречь этой величиной, отнеся ее оценку к числу задач будущих исследований.

Помимо перечисленных экспериментов, цель которых состояла главным образом в наборе необходимых характеристик экспериментального процесса для правильной его интерпретации, также выполнена серия экспериментов для оценки динамики выветривания во времени. Этот показатель и ход процесса выноса оказались весьма сходными с процессом физического выветривания и будут рассмотрены при сравнительном анализе физического и химического выветривания. Таким образом, проведенные как бы подготовительные эксперименты дали необходимые критерии для сравнения лабораторного и природного процесса. С учетом полученных данных рассчитано время, которому соответствуют условия нашего опыта (табл. 28). При расчете принималась во внимание средняя летняя температура приземных слоев воздуха и вводилась поправка, учитывающая, что в районах Северо-

Таблица 26

Коэффициенты ускорения выветривания гипербазитов  
в зависимости от увеличения температуры среды

Интервал температуры, °С	Размерные фракции материала, мм			
	40-10	10-5	5-1	1-0,5
0-10	3,0	2,0	8,1	10,4
10-20	1,0	2,0	2,5	1,9
20-30	1,0	2,0	3,0	2,9
30-40	1,1	1,0	1,6	1,2
40-50	1,5	1,0	1,0	1,0
50-60	1,2	0,9	0,9	0,8
60-70	1,1	1,0	0,9	0,8

Востока теплый период составляет только небольшую часть года, а температура почвенного слоя на 2-3° выше температуры воздуха [88]. Значения рН в различных типах почвенных горизонтов на Северо-Востоке СССР варьируют в широких пределах: 3,8-7,9 [95] или 4,0-7,8 [99]. Поскольку наши подсчеты носят характер поиска методики решения задачи, то для всех перечисленных в табл. 28 пунктов значение рН принято равным 7,0. Надо заметить, что такое значение рН принято также из того соображения, что при физическом выветривании нами использовалась дистиллированная вода. Поэтому для сопоставления физического и химического выветривания последнее следовало приравнивать к той среде, которая существовала в условиях лабораторных экспериментов по физическому выветриванию. При расчете интенсивности выветривания не принима-

Таблица 27

Зависимость интенсивности выветривания гранодиоритов от рН среды (по величине потери массы, %)\*

рН среды		Суммарные потери массы	Состав потерь, вес. %	
до опыта	после опыта		дисперсная фаза	жидкая фаза
2,0	2,85	0,32	5,14	94,86
2,5	3,29	0,18	11,56	88,44
3,0	3,45	0,11	7,92	92,08
3,5	4,22	0,06	6,40	93,60
4,0	4,95	0,10	19,40	80,60
4,5	7,40	0,09	17,30	82,70
7,0	8,78	0,09	16,30	83,70

Таблица 28

Коэффициенты ускорения процесса выветривания в эксперименте географических пунктах и продолжительность процесса в реаль-

Пункт	Количество осадков $P$ , мм	Величина испарения $E$ , мм	Величина дренажа, мм/год
Верхоянск	150	100	50
Среднеколымск	190	100	90
Зырянка	265	100	165
Сеймчан	280	120	160
Среднекамск	420	100	320
Якутск	200	150	50
Палатка	380	150	230
Нагаево	430	150	280
Петропавловск-Камчатский	1000	200	800
Уссурийск	600	350	250
Озерные Ключи	640	400	240
Владивосток	719	400	319
Маршалловы острова	4500	1300	3200

\* В скобках дана поправка на продолжительность теплого периода года.

лись во внимание величины радиационного баланса каждого из пунктов. Этот вопрос также требует дополнительного изучения с точки зрения количественных взаимосвязей между величиной радиационного баланса и его литогенетическим выражением. Таким образом, полученные экспериментальные данные (см. табл. 28) являются попыткой оценить в приближенной форме скорость химического выветривания в различных климатических условиях. Из этих данных следует, что в эксперименте за 156 ч воспроизведены те явления и эффекты, которые в условиях влажных тропиков (Маршалловы острова) могли быть достигнуты за 18,66 года, а в условиях Якутска — только за 7257 лет, т.е. за интервал времени в 389 раз больший. Если проанализировать структуру такой акселерации выветривания в тропиках по сравнению с зоной Якутска, то окажется, что это достигается за счет большей величины дренажа (в 64 раза) и только в 6 раз — за счет разницы в температуре среды выветривания.

Отмечается определенный разброс значений интенсивности выветривания для географических пунктов, находящихся практически в одной и той же климатической зоне. Эти различия обусловлены разным количеством осадков, колебаниями величины испарения и летних температур. Полученные временные реперы для оценки скорости вывет-

по сравнению с естественными условиями в различных  
ном масштабе времени

Средняя температура, °С	Коэффициенты ускорения			Время, моделируемое за 156 ч, год
	по дренажу	по температуре	по pH	
8,7	274,26	10,03 (2,51)*	2	5502
7,3	152,37	11,06 (2,99)	2	3370
9,0	83,11	8,96 (2,42)	2	1489
8,8	85,71	9,20 (2,48)	2	1577
7,1	42,85	11,38 (3,07)	2	975
12,2	274,26	13,23 (3,57)	2	7257
7,4	59,62	10,89 (2,94)	2	1298
8,9	48,97	7,40 (2,44)	2	725
9,8	17,14	6,74 (2,22)	2	231
16,7	54,85	6,38 (2,62)	2	700
16,0	57,14	6,65 (2,72)	2	760
15,1	42,99	5,23 (2,88)	2	450
25,0	4,28	2,18	2	19

ривания в эксперименте относительно реального масштаба времени в природе использованы в дальнейшем для сравнения интенсивности выветривания рудного материала различных россыпьеобразующих формаций и для сравнения химического выветривания с физическим.

#### Выветривание рудного материала

При характеристике матричных минералов коренных источников мы отмечали, что интегральный эффект скорости выветривания того или иного рудного тела трудно оценить, опираясь на расчетные данные об устойчивости минералов, образующих рудную массу. В этом отношении предпочтительнее путь эксперимента, в котором тот или иной объем рудного материала, с определенной степенью достоверности отражающий свойства всего рудного тела, испытывает химическое воздействие среды, сходной с природной. Поскольку в эксперименте создаются условия для наиболее жесткого, экстремального воздействия на рудный материал, то мы вполне можем быть уверены хотя бы в том, что в природных условиях процесс выветривания не может идти с большей интенсивностью. Таким образом, мы получаем верхний предел интенсивности выветривания, а это само по себе весьма важно. С другой стороны, даже отвлекаясь от

Таблица 29

Интенсивность химического выветривания рудного материала россыпьеобразующих формаций золота, касситерита, платины и алмазов (по величине потери массы) за 156 часов опыта

Формация	Общий вынос		Состав выносимого вещества, %	
	г	%	в дисперсной фазе	в жидкой фазе
Золото-кварцевая малосульфидная	0,26	0,04	62,71	37,29
Золото-кварцевая умеренно-сульфидная	1,98	0,53	91,41	8,59
Касситерит-кварцевая	0,33	0,12	74,90	25,10
Касситерит-силикатная	1,57	0,81	19,46	80,54
Касситерит-сульфидная	11,05	5,50	67,12	22,88
Дунитовая	8,24	2,92	68,15	31,85
Кимберлитовая	22,09	7,16	83,38	16,62

вопроса о достоверности одного эксперимента, индивидуального для какого-либо типа рудного материала, в результате серии опытов мы получаем данные для различных типов руд и горных пород, находившихся в совершенно идентичных условиях. Следовательно, совершенно уверенно можно полагать, что для данного ряда образцов получен некоторый ряд экспериментальных характеристик, отражающих относительное поведение исследуемого материала в заданных условиях. Очевидно, что такая информация дает необходимую основу для оценки в сравнительном плане особенностей поведения россыпьеобразующих формаций в природных условиях.

Опыты по моделированию химического выветривания проводились в идентичных охарактеризованных выше условиях по величине pH среды (2,5), по времени (156 ч), по температуре и т.д. Для опытов использовались штUFFы рудного материала, наиболее типичного для месторождений каждой россыпьеобразующей формации по текстурно-структурным особенностям, плотности, пористости, минеральному составу. Число исследованных образцов для каждого типа руд достигало 30-35 (если в опытах получался разброс значений) и в среднем 10 образцов для месторождений, руды которых давали устойчивые показатели выветривания. Чаще всего это были руды золото-кварцевой и касситерит-кварцевой формаций. До и после опытов определялись физико-механические свойства экспериментальных образцов (пористость, плотность, сопротивление сжатию). Полученные экспериментальные данные (табл. 29) выявляют резкие отличия рос-

сыпееобразующих формаций по отношению к процессам химического выветривания. Золото-кварцевая формация оказывается в 179 раз более устойчивой по сравнению с кимберлитовой, в 73 раза — по сравнению с дунитовой, в 137 раз — по сравнению с касситерит-сульфидной и т.д. Результаты экспериментов выявили также образование значительного количества дисперсного материала, который выносился из рудного материала в форме тонкой взвеси и сравнительно крупных обломков, размером до 1 мм. Обычно количество дисперсной фазы недостаточно для полного минералогического анализа, однако при изучении под микроскопом отчетливо диагностировались частицы кварца, касситерита, турмалина и других наиболее устойчивых минералов. Какой-либо четкой зависимости распределения жидкой и дисперсной фаз от состава рудного материала не выявилось, однако при уменьшении содержания кварца вынос в жидкой фазе обычно преобладал.

Таким образом, главным итогом моделирования химического выветривания следует считать получение количественных данных о сравнительной устойчивости россыпееобразующих формаций. Это позволяет анализировать эти формации в трех основных аспектах: сопоставить интенсивность физического и химического выветривания; приблизительно оценить темп химического выветривания рудного материала индивидуально каждой формации; оценивать наиболее благоприятный механизм высвобождения россыпееобразующих минералов из рудного вещества каждой формации. К этим вопросам мы будем многократно обращаться во всех последующих разделах книги.

Однако, чтобы завершить главу о роли выветривания в россыпееобразовании, необходимо дать общий анализ физического и химического выветривания. На основе этого анализа открываются реальные перспективы решения проблемы выветривания в геологии россыпей в целом.

#### ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ В ГЕОЛОГИИ РОССЫПЕЙ

Итак, после изложения целого ряда теоретических соображений, а также геологического и экспериментального материала по физико-химическому выветриванию мы вплотную подошли к решению одной из кардинальных проблем геологии россыпей — проблемы выветривания коренных источников и высвобождения россыпееобразующих минералов. В соответствии с общим замыслом книги мы будем обращаться к этой проблеме с различных точек зрения, чтобы осветить ее в наиболее широком физико-химическом, палеогеографическом и литогенетическом аспектах. Но прежде следует продолжить анализ и обсуждение физико-химических факторов и условий выветривания рудного вещества в свете приведенных выше данных, чтобы в дальнейшем перейти к их интерпретации в приложении к общим задачам геологии россыпей.

## Принципиальная схема физико-химического выветривания рудного материала и высвобождения россыпеобразующих минералов

Конечным результатом исследования физико-химического выветривания в геологии россыпей должен быть ответ на вопрос о механизме высвобождения россыпеобразующих минералов из матричного рудного вещества. Рассмотрим два типичных варианта выветривания — по физическому и химическому типу (рис. 29). Выветривание начинается по ослабленным или дефектным зонам, границам блоков или единичных зерен. В зависимости от преобладающих факторов оно может приобрести характер термодислокаций, когда границы зерен будут испытывать взаимные относительные смещения или будет происходить механическое раздвижение зерен под действием сил, рассмотренных выше (см. табл. 8). Трещины, имевшиеся в крупном рудном материале изначально, будут постепенно удлиняться (см. рис. 29, вариант А, I стадия).

В химическом варианте выветривания этот процесс может начаться только в том случае, если реакционно-способная жидкая фаза будет иметь доступ к трещинным и разнообразным иным дефектам и неоднородностям в исходной руде. Если доступа жидкой фазе к свежим поверхностям матричного минерала нет, то никакого выветривания происходить не будет. Таким образом, главным и совершенно обязательным условием химического выветривания должна быть доступность трещинных зон для проникновения жидкой фазы. Кроме того, эти трещинные зоны должны обеспечивать двустороннее движение ионов вдоль стенок трещин. В ином случае обменные реакции прекратятся и выветривание остановится. Химическое выветривание само по себе не в состоянии обеспечить быстрый рост трещин и их большее раскрытие. Сравнивая физическое и химическое выветривание на самой ранней стадии этого процесса, мы убеждаемся в необходимости физического предразрушения исходного рудного материала, для того чтобы могло произойти наложение химических процессов. Первичность физических факторов выветривания отчетливо видна и с энергетической точки зрения. До четвертого энергетического уровня (см. табл. 6) в морфолитогенных процессах энергия расходуется преимущественно в механической форме, поскольку диспергация материала до размерности единичных обломков идет с минимальными затратами энергии в ее наиболее простой, физической форме.

Первичность физических механизмов выветривания рудного материала по отношению к химическому проявляется также и в том, что физическое разрушение, строго говоря, может (нередко так и бывает) происходить без какого-либо участия химических процессов или при совершенно ничтожном их участии. В то же время химическое выветривание для своего развития требует наличия физической предразрушенности твердого тела и постоянного обнажения все новых участков минералов, раскрытия раствороподводящих каналов в структуре рудного вещества. Отмеченные принципиальные различия физических и химических механизмов выветривания и их определенная асинхронность хотя и важны для понимания фи-



зико-химического выветривания, но скорее имеют методологическое значение. В реальных природных процессах выветривания физические и химические механизмы сливаются в один процесс, их стабильность во времени не всегда просматривается отчетливо, что и послужило причиной довольно расплывчатых представлений о сущности этого процесса и его роли в высвобождении россыпеобразующих минералов.

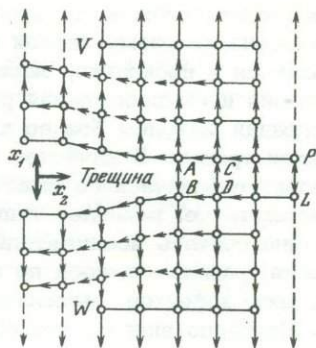
В природных условиях одним из главных факторов, нарушающих идеальную схему соотношения физического и химического выветривания, является наличие воды, т.е. той среды, в присутствии которой химические процессы резко ускоряются. Как только физические механизмы обеспечивают раскрытие внутренних трещин на ширину несколько десятков ангстрем, становится возможным участие химических механизмов в развитии процесса выветривания. Присутствие воды как бы нивелирует различия между физическими и химическими механизмами разрушения. Это выражается, в частности, в том, что и физическое и химическое выветривание переводят часть вещества в жидкую фазу. Если мы рассмотрим процесс на атомно-ионном уровне, то станет ясно, что непосредственное воздействие ионов диссоциированной жидкой фазы на напряженную атомную связь  $AB$  (рис. 30) может привести к разрыву этой связи и продвижению трещины в направлении  $x_2$ , что способствует ускорению разрушения рудного материала. Однако этот процесс стимулирования роста трещин под воздействием химических явлений протекает сравнительно медленно, поэтому рост трещин при физическом выветривании опережает развитие трещин в структуре рудного вещества при химическом выветривании.

При физическом выветривании диспергация материала не может идти после достижения материалом определенной крупности. При химическом выветривании диспергация развивается на поверхности трещин, в состав дисперсной фазы переходят зерна устойчивых минералов и гелеобразные тонкодисперсные массы новообразованных минералов. Поэтому если изобразить продукты выветривания в виде графика гранулометрического состава, то гранулометрический спектр физического выветривания будет иметь тенденцию к одновершинному распределению, а спектр химического выветривания — к двухвершинному (см. рис. 29, IV, А и Б соответственно).

Итак, принципиальная схема выветривания рудного материала состоит из нескольких физико-химических явлений, происходящих одновременно в структуре рудного тела. Свообразным генетическим кодом, предопределяющим "программу" выветривания, являются особенности физического состояния выветривающегося материала. Рудные тела приходят в зону гипергенеза с многочисленными эндогенными и пострудными нарушениями их монолитности. Дальнейший физико-химический процесс выветривания развивается одновременно на четырех различных уровнях: макрофрагментация (I), микрогрануляция (II), атомно-молекулярная диспергация (III) и ионно-атомные взаимодействия (IV). Каждый из этих частных механизмов развивается синхронно с остальными, но в определенном взаимном со-

Рис. 30. Схема воздействия усилий на атомные связи около вершины острой трещины (штриховой линией условно показаны разгруженные области)

$x_1$  — растягивающие напряжения;  $x_2$  — направление роста трещины;  $V$  и  $W$  — свободные от напряжения области;  $AB$  — максимально нагруженная связь;  $CD$  — менее нагруженная связь;  $PL$  — свободная от нагружения связь [102]



отношении и при определенной доле участия физических и химических факторов. При макрофрагментации наблюдаются явления и трех остальных уровней, но роль их невелика. При развитии микрогрануляции роль физических факторов затухает, а основное значение приобретают химические факторы.

Нетрудно заметить, что на уровне макрофрагментации принципиальной разницы между физическим и химическим распадом вещества нет. И та и другая группа явлений производят некоторую работу по дезинтеграции, разобшению монолита на составные части. На уровне микрогрануляции значение химических факторов возрастает, так как растет свободная поверхность и становится все меньше свободных дефектных зон, в которых локальные перенапряжения связей могли бы создаваться физическими факторами вследствие повышения изомерии зерен, по Е.В. Рухиной и В.Г. Чистякову [136], а также вследствие ряда других причин. Хотя в целом грануляция идет по физической схеме, но все большее значение начинает приобретать отрыв отдельных ионов из атомной структуры, переход их в раствор и общее разрыхление минерального каркаса. Атомно-молекулярная диспергация захватывает продукты третьей стадии в тот момент, когда дисперсная система становится вполне устойчивой к физическому выветриванию.

На фоне развивающегося физического выветривания мощным стимулятором хемогенной экстракции вещества в раствор является процесс периодического промерзания и протаивания среды. При фазовых переходах воды лед оказывает не только механическое действие на стенки трещины. Как показывают эксперименты, лед вгоняет незамерзшую пленочную воду в поры трещинного микрорельефа, оказывая растягивающее, расталкивающее действие на верхний молекулярный слой. При обратном процессе (оттаивании) прочно связанная вода может частично выдавливаться силами атомного взаимодействия наружу и захватывать при этом некоторое количество ионов, имеющих ослабленные связи с основной кристаллической структурой рудного вещества (матричного минерала).

Рассмотрение принципиальной схемы физико-химического выветривания показывает, что если не вдаваться в анализ тонких хими-

ческих механизмов, то процесс высвобождения россыпеобразующего минерала из элементарной ячейки матричного вещества может развиваться в нескольких вариантах. Наиболее простой случай выветривания и высвобождения россыпеобразующего минерала — дезинтеграция матрицы без ее химического изменения по системам имеющихся трещин. В качестве второго варианта можно рассматривать развитие физического выветривания в сочетании с химическими процессами, т.е. наиболее типичный случай. Третьим типом выветривания можно считать исключительное преобладание химического выветривания, развивающегося по системам физических неоднородностей — трещин, дефектов, выщелачивания неустойчивых минералов и т.п.

Нетрудно видеть, что принципиальной разницы в деструкции коренного источника при всех трех вариантах нет. Во-первых, во всех трех случаях масса ценного компонента остается неизменной. Во-вторых, при любом из вариантов сущность процесса сводится к грануляции физико-химической системы по первичным трещинам. В-третьих, масса выветривающегося матричного вещества постепенно уменьшается, причем вынос происходит опять же в любом случае в двух фазах — жидкой и дисперсной. Следовательно, при сопоставлении физического и химического выветривания речь может идти только о количественных различиях этих вариантов выветривания, о большей или меньшей эффективности того или другого для накопления россыпеобразующих минералов. Причем наиболее простой основой для сравнения физического и химического выветривания может служить масса выносимого материала, поскольку именно вынос матричного вещества ведет к относительному обогащению исходной руды ценными минералами.

Величина потери массы исходного рудного материала при физико-химическом выветривании позволяет таким образом, сопоставить россыпеобразующую функцию физического и химического типов выветривания.

#### Сравнительный анализ физического и химического выветривания

Вопрос о сравнении физического и химического выветривания в методическом отношении совершенно не разработан. Остается неясной правомерность самой постановки такого вопроса, поскольку мы видели выше, что выветривание как процесс имеет единую физико-химическую природу и грань между физической и химической составляющими провести трудно. Тем не менее в теории континентального литогенеза широко используется представление о механической и химической денудации. Аналогичными понятиями пользуются почвоведение, гидрология, геохимия и некоторые другие науки. В геологии россыпей вопрос о соотношении физического и химического выветривания следует рассматривать не только в связи с известной дискусионностью проблемы выветривания и высвобождения россыпеобразующих минералов. Этот вопрос имеет реальное содержание и в том отношении, что климатическая зональность на поверхности Земли объективно создает либо резкое преобладание физических факторов выветривания коренных источников, либо сочетание физических и хи-

Таблица 30

Скорость физического выветривания россыпеобразующих формаций (величина потери массы в пересчете на 1 цикл  $\pm T^{\circ}C$ ) (в  $n \cdot 10^{-3}\%$ )

Формации						
золото-кварцевая		касситеритовые			дунитовая	кимберлитовая
малосульфидная	умеренно-сульфидная	кварцевый тип	силикатный тип	сульфидный тип		
0,7	7,6	1,2	2,7	19	8,5	17
3,8	16,5	1,4	3,4	45	4,5	13
0,4	11,6	1,4	3,4	31	5,6	5
0,2	10,4	1,3	2,3	29	7,2	253
0,2	7,8	1,5	2,8	17	3,8	53
0,7	9,1	0,4	3,2	35	5,9	82
0,2	8,2	0,6	2,5	41	6,1	32
0,4	7,5	1,1	3,5	12	7,0	43
0,2	6,1	1,5	2,7	19	6,5	5
0,9	7,8	1,6	3,5	22	7,0	28
1,4	6,2	1,3	3,3	40	5,0	21
0,9	5,9	1,2	2,9	39	4,0	28
1,0	7,7	1,4	2,6	41	6,0	30
2,0	8,1	1,5	3,2	43	7,0	7
1,5	9,2	1,3	3,7	17	6,0	42
0,2	11,1	1,5	3,8	25	9,0	31
0,7	12,0	1,6	3,6	33	7,0	29
0,5	11,5	1,2	2,5	35	8,0	17
0,4	7,6	1,7	1,9	23	4,0	38
$\bar{x} = 0,86$	9,05	1,30	3,03	29,79	6,21	40,74
$S = 0,83$	2,54	0,33	0,52	45,79	1,42	27,52

мических, или же отчетливое превосходство внешних признаков химического выветривания при затуханности проявлений физических механизмов. Наиболее важен при сопоставлении физического и химического выветривания выбор критериев для такого сопоставления, и этот вопрос является наиболее трудным. Действительно, на основании чего, по каким признакам можно сравнить выветривание некоторого объема рудного материала на севере Якутии и выветривание такого же объема и того же состава материала в Африке, на экваторе? Очевидно, что для геологии россыпей наиболее объективным в этом отношении был бы такой критерий, который позволял бы оценить, за какое время в обоих рассматриваемых случаях произошло высвобождение россыпеобразующих минералов из вмещающего матричного вещества. Хотя такое высвобождение еще не означает накопления ценных минералов в виде россыпной концентрации, но тем не менее в этом случае решающее условие для россыпеобразования было бы достигнуто. Для того чтобы развивался процесс концентрации, необходимо выполнить второе условие - удаление части рудовмещающего материала, что и приведет к концентрированию устойчивых

ценных минералов. Подобная схема рассуждений привела нас к необходимости учитывать при сравнении физического и химического выветривания, кроме фактора времени, еще один критерий — размерность продуктов выветривания. Нетрудно показать, что в качестве такого критерия удобно взять песчаную размерность зерен, т.е. фракцию мельче 1 мм. Начиная с этого размера частицы подвержены транспортировке любыми агентами эрозии и денудации — от дефляции до инфильтрации, и, следовательно, продукты выветривания такой размерности смогут удаляться из зоны выветривания, способствуя россыпеобразованию. За критерий сравнения физического и химического выветривания целесообразно использовать время (скорость) выветривания исходного продуктивного материала и прощипывания при этом обломочных частиц мельче 1 мм.

Удобство предлагаемого критерия также в том, что интенсивность выветривания материала легко определять по разности его массы до выветривания и спустя некоторое время, после уменьшения его массы на величину потерь, в которые вошли все частицы мельче 1 мм. Используя эту методику, мы оценивали скорость физического выветривания продуктивного материала различных россыпеобразующих формаций (табл. 30). По этому же показателю оценивалась скорость химического выветривания за 156 ч экспериментального процесса (см. табл. 29). Следовательно, если мы приравняем полученные величины к одной и той же единице времени, предположим к одному земному году, то получим вполне объективный критерий сравнения физического и химического выветривания по скорости продуцирования материала мельче 1 мм в течение одного года. Таким образом, полученные экспериментальные данные (см. табл. 29, 30) позволяют количественно оценить сравнительную устойчивость россыпеобразующих формаций к физическому выветриванию (ряд физической устойчивости) и к химическому выветриванию (ряд химической устойчивости). Кроме того, можно оценить эффективность физического или химического типа выветривания для каждой формации отдельно.

Выше уже отмечалась одна общая черта физического и химического выветривания: одинаковая структура продуктов выветривания в виде соотношения жидкой и дисперсной фаз. Указывалось также, что при химическом выветривании улавливается тенденция преимущественного выноса продуктов выветривания в жидкой фазе для рудного вещества малокварцевого состава (см. табл. 29). Для выявления такой же тенденции в более убедительной форме вычислены средние значения состава потерь массы в жидкой и дисперсной форме для золото-кварцевых руд в зависимости от содержания в них кремнезема (в основном в виде кварца). Установлено, что присутствие в большом количестве кварцевого материала резко снижает величину потерь в жидкой фазе (табл. 31).

Подтверждено экспериментально эффективное воздействие фазовых переходов воды на интенсивную химическую экстракцию минерального вещества горных пород. Иногда наблюдалось своеобразное вытаивание кальцитовых прожилков в выветривающейся породе после первых 20–30 циклов промерзания–протаивания (рис. 31). В све-

Таблица 31

Вынос материала в дисперсной и жидкой форме из выветривающегося рудного вещества в зависимости от прокварцованности материала (за  $250 \cdot (\pm T^{\circ}, C)$ )

Содержание кварца в руде, %	Валовые потери,	Состав потерь, %	
		в жидкой фазе	в дисперсной фазе
От 100 до 95	0,14	3,41	96,59
80-90	0,25	16,51	83,49
70-80	0,31	40,75	59,25
50-60	0,49	52,96	42,04

те полученных данных вопрос о соотношении физического и химического выветривания, а также о структуре продуктов выветривания (отношение жидкой и дисперсной фаз) по-прежнему оставался не вполне ясным. В теоретическом отношении этот вопрос представлялся легко объяснимым, но динамика выноса продуктов выветривания требовала дополнительного изучения. Кроме того, экспериментальные данные, полученные для разного рудного материала различных формаций, могли быть обусловлены индивидуальными особенностями этого материала.

Для получения дополнительной информации о сущности физико-химического выветривания и распределении жидкой и твердой фаз в продуктах выветривания поставлен специальный опыт, в котором образцы, вводившиеся в эксперимент по физическому и химическому выветриванию, были тщательно идентифицированы по удельному весу, пористости и минералогическому составу. Для опыта использовались руды олова различных месторождений Северо-Востока СССР (коллекция Л.В. Спорыхиной) и ЧССР (коллекция автора). В качестве примера рассмотрим результаты, полученные в одном из опытов с 10 образцами оловянных руд (табл. 32).

Как и в предыдущих опытах по физическому выветриванию, в начале опыта происходило нарастание пористости образцов вследствие интенсивного раскрытия внутренних микротрещин, пор, межзерновых сочленений и т.п. Этот процесс наиболее заметно выражен в первых 50-100 циклах, после чего наблюдается стабилизация с отдельными резкими подъемами и новыми затуханиями (рис. 32). По характеру раскрытия трещин и пор экспериментальные образцы распределились на три группы - с небольшой, средней и высокой пористостью. Динамика нарастания пористости свидетельствует о наличии периодов накопления в образце микроразрушений, зон перенапряжения и затем в быстром, одноактном разрушении в напряженном очаге. В результате происходит увеличение пористости, затем следует период накопления напряжений для нового разрыва и т.д. Каждая такая микрокатастрофа во внутренней структуре образцов

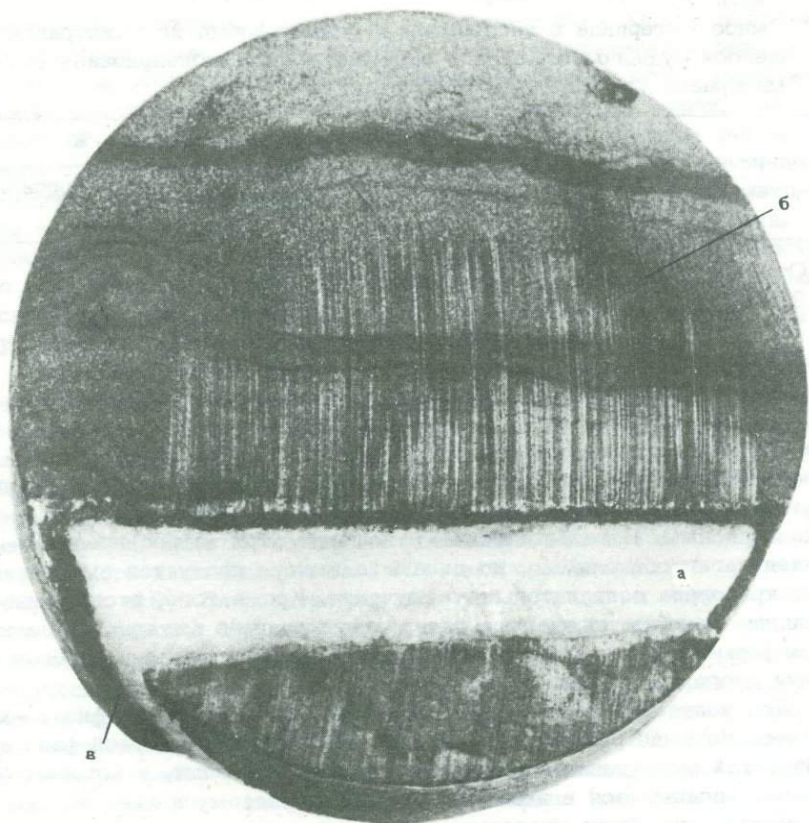


Рис. 31. Опережающее разрушение карбонатного прожилка в песчанике при физическом выветривании

*a* — кальцитовый прожилок; *b* — песчаник; *v* — каемка вмещающей породы, обнажившаяся за счет избирательного выветривания прожилка

сопровождается не только увеличением пористости, но и поступлением из очага микроразрушения образовавшихся при очередном разрыве дисперсных и растворенных частиц. Это явление обнаруживается в синхронно проявляющемся процессе выноса из экспериментального образца продуктов распада внутренних связей и в потере его массы (рис. 33,А). По величине потери массы образцы также распределяются на три группы.

Химическое выветривание имеет весьма сходную кинетику разрушения внутренних связей в рудном веществе и выноса продуктов выветривания. Наиболее интенсивный вынос наблюдается в первые моменты выветривания, после чего процесс резко замедляется (см. рис. 33,Б). В эту первую фазу выносятся наиболее подвижные компоненты, разрушаются неустойчивые минералы, происходит отрыв устойчивых частиц, но слабо связанных с основной массой рудного об-

Таблица 32

Характеристика образцов в опыте по физико-химическому выветриванию оловянных руд

Номер образца и характер рудного материала	Исходный вес пр. физическом выветривании, г	Исходный вес при химическом выветривании, г	Начальная пористость, %
1. Кварц жильный с касситеритом и грейзеновой оторочкой	99,2828	164,6107	0,30
2. Роговик с грейзеновой оторочкой и минерализацией касситерита	75,0421	201,9680	0,74
3. Кварц крупнокристаллический с агрегатами касситерита	84,7140	671,2391	0,11
4. Пегматит с проявлениями грейзенизации и оловянным оруденением	64,4978	320,7536	0,27
5. Жильный кварц из роговиков с касситеритовой вкрапленностью	78,5578	280,0130	0,23
6. Кварц жильный с касситеритом	75,7357	168,6533	0,16
7. Турмалин-касситеритовая руда	150,0674	371,2951	0,22
8. Касситеритовая руда кавернозной, пористой структуры	113,9422	102,4985	1,59
9. Метасоматит турмалиновый с касситеритом	105,8143	301,1303	0,99
10. Касситерит-сульфидная руда	152,8988	179,9062	0,64

ломка (краевые выступы, ребра, углы и т.д.). Кроме того, в процессе выветривания происходит постепенное заполнение новообразованными минералами трещин, пор и концевых участков микротрещин, в результате чего резко нарушается контакт воды с более глубокими зонами минералов.

Весьма интересны данные, полученные в этом опыте, о соотношении потерь массы в жидкой и дисперсной форме, а также об эффективности физического и химического выветривания для разрушения первичного рудного вещества до крупности менее 1 мм. Оказалось, что соотношение жидкой и твердой фаз в продуктах выветривания устойчивых к выветриванию руд находится в сопоставимых пределах

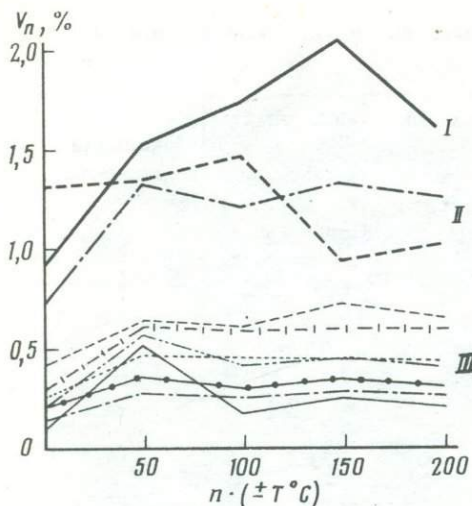


Рис. 32. Характер изменения пористости ( $V_n$ ) в выветривающихся оловянных рудах

I-III - группы образцов с различной исходной пористостью

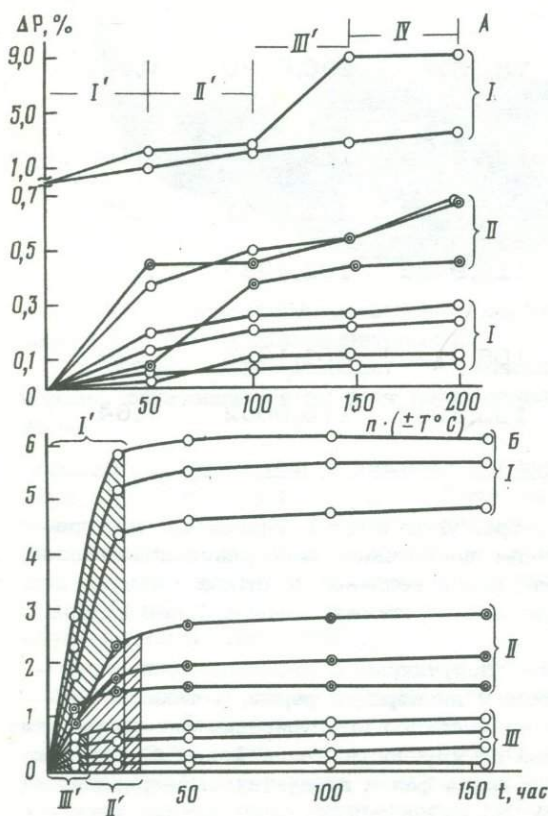


Рис. 33. Изменение массы образцов при выветривании

Физическое выветривание (А): уменьшение массы образцов ( $\Delta P$ ) при выветривании, I-III - группы образцов сходного состава, I<sup>1</sup>, II<sup>1</sup>, III, IV - различные фазы процесса выветривания, отражающие дискретность физического выветривания. Химическое выветривание (Б): уменьшение массы ( $\Delta P$ ) образцов при выветривании, I<sup>1</sup>, II<sup>1</sup>, III<sup>1</sup> - начальные фазы максимального выноса продуктов химического выветривания из руд максимальной (III), средней (II) и минимальной (I) устойчивости

как при физическом, так и при химическом выветривании (табл. 33). Высокие значения потерь в жидкой фазе при физическом выветривании оловянных руд легко объяснимы, если учесть, что они сложены преимущественно кварцем и диспергация их должна наступить после нескольких сотен циклов выветривания.

Весьма важен также тот факт, что химический вариант выветривания по своей способности к диспергированию мелкоземистого материала заметно уступает физическому выветриванию. С теоретической точки зрения этот факт прекрасно согласуется с теорией прочности и представлениями о кристаллохимических механизмах выветривания: физический процесс идет на более низком энергетическом уровне, а химическая деструкция требует разрыва наиболее прочных ионно-атомных связей. Поэтому физический процесс оказывается результативнее, чем химический, особенно в отношении продуцирования дисперсного материала. В целом же на основании экспериментальных данных возникает представление о тесной сопряженности физической и химической составляющих выветривания. На этот факт давно обратили внимание литологи и почвоведы. В частности, на необходимость и возможность физического выветривания в условиях влажного жаркого климата указывал Б.Б. Польнов [119]. В.М. Силицын отмечает, что в условиях влажных тропиков физико-механическое разрушение предшествует химическому [146]. Н.М. Страхов подчеркивает, что "хотя точной математической пропорциональности между величинами механической и химической денудации и нет, но все же изменяются они по одному общему закону: с усилением механической денудации усиливается и химическая, и наоборот" [159, с. 19]. Этот вывод Н.М. Страхова содержит в себе признание, в сущности, ошибочности противопоставления физического и химического выветривания. Как мы видели выше, физико-химическое выветривание — единый процесс, идущий одновременно на разных энергетических уровнях с разной интенсивностью, а на атомно-ионном уровне полностью теряющий отличительные признаки физических и химических явлений. Это утверждение совершенно не противоречит тому, что первичным фактором выветривания является физическое состояние кристаллического тела и что первичное физическое развитие разрушения открывает доступ реакционноспособной жидкой фазе для взаимодействия с кристаллической структурой минералов.

Таким образом, пытаясь найти решение проблемы выветривания в геологии россыпей, мы снова сталкиваемся с фундаментальными проблемами теории литогенеза, в частности с одним из главных вопросов этой теории — с вопросом о темпах денудации, о соотношении механической и химической денудации, о роли климатических и тектонических факторов в литогенезе и т.д. К этим вопросам, имеющим прямое отношение и к геологии россыпей, целесообразно еще раз вернуться после анализа литогенетических процессов в речных руслах, поскольку в областях мобилизации материала процесс выветривания не завершается полностью.

Подводя итоги анализу физико-химических факторов и условий

Таблица 33

Эффективность физического и химического выветривания опояванных

№ обр.	Физическое выветривание за 200 · ( $\pm T^{\circ}C$ ) <sup>*</sup>			Химическое
	общий вы- нос, %	в том числе		общий вы- нос, %
		в дисперсной фазе	в жидкой фазе	
1	0,08	52,01	47,99	0,16
2	0,12	11,92	88,08	0,10
3	0,24	15,69	84,31	1,33
4	0,30	25,64	74,36	0,11
5	0,46	13,10	86,90	0,89
6	0,50	26,49	73,51	0,64
7	0,68	32,77	67,23	0,60
8	0,68	23,75	76,25	0,04
9	0,91	32,67	67,33	0,60
10	0,97	69,93	30,07	0,45

\* 200 циклов соответствуют 3,33 года.

2\* 156 ч. соответствуют 18,66 года.

выветривания рудного материала, необходимо подчеркнуть несколько аспектов. Экспериментальные данные показывают, что даже для однотипного в целом рудного материала скорости выветривания могут отличаться в 10–15 раз. Эта разница еще более возрастает, если сравнивать рудный материал, относящийся к разным россыпеобразующим формациям, с различным набором устойчивых и неустойчивых минералов. Следовательно, первый вывод, который необходимо учитывать при анализе россыпеобразующих возможностей той или иной формации, – это вывод о дифференцированном подходе к каждому типу рудного вещества.

Вторым важным выводом является установленная закономерность в соотношении физического и химического выветривания. Вся современная теория прочности, физика разрушения, геоэнергетическая теория и целый ряд других научных дисциплин свидетельствуют о том, что процесс физического разрушения – это наименее энергоемкий процесс, проявляющийся при любых физико-механических взаимодействиях. Если учесть при этом, что матричное вещество во многих случаях химически весьма инертно, то станет ясно, что физическое выветривание – наиболее эффективный способ разрушения первичного рудного вещества. К этому надо добавить, что физическое выветривание резко усиливается в речном русле за счет гидромеханического дробления, истирания и т.д.

Наконец, третьим важнейшим аспектом проблемы выветривания в геологии россыпей является решение ее на энергетических принципах литогенеза. В различной климатической обстановке соотношение физических и химических факторов может меняться. Но эти вари-

руд (по величине выноса материала < 1 мм)

выветривание за 156 ч <sup>2*</sup>		Потеря массы за 1 год, %	
в том числе		при физическом выветривании	при химическом выветривании
в дисперсной фазе	в жидкой фазе		
53,39	46,61	0,02	0,009
10,53	89,47	0,04	0,005
93,85	6,15	0,07	0,070
11,38	88,62	0,09	0,006
40,23	59,77	0,14	0,050
48,80	51,60	0,15	0,030
38,86	61,14	0,20	0,030
37,29	62,71	0,20	0,002
29,54	70,46	0,27	0,030
99,38	0,62	0,29	0,020

ции вовсе не означают уменьшения общего количества энергии, которое может быть затрачено на выветривание. Поскольку гравитационное поле Земли не дискретно, а сравнительно однородно, то в различных широтах гравитационная энергия, расходуемая на процессы физико-механической деструкции (выветривания), не может различаться в большее число раз, чем различается гравитационное поле в сравниваемых пунктах. Точно так же параметры второго мощного источника энергии — Солнца в разных широтах имеют значения, различающиеся на вполне определенную величину. Физико-химический процесс, задаваемый этими двумя источниками энергии, не может выйти за пределы разрешенного энергетического уровня. В любой точке нашей планеты может меняться лишь соотношение энергетических факторов, но общая интенсивность процесса выветривания колеблется в сравнительно узких пределах.

Рассмотренные выше физико-механические представления характеризуют те граничные факторы и условия, в которых развивается природный процесс россыпеобразования. В реальной геологической среде эти физико-химические факторы преломляются в разнообразных литогенетических явлениях, механизмах и процессах, которые протекают на ином уровне и соответствуют иным массам вещества, масштаба времени и пространства, т.е. развиваются в эволюционирующей геологической обстановке. Следовательно, можно сделать вывод о том, что в геологии россыпей решение проблемы выветривания коренных источников, с одной стороны, не может быть достигнуто на основе общих литогенетических представлений, а с другой, — оно невозможно также на основе только экспериментальных данных и ана-

лиза физико-химических основ этой проблемы, без учета геологических факторов россыпеобразования. Именно в сочетании широкого литогенетического подхода с экспериментальными физико-химическими данными в преломлении к геологическим ситуациям видится нам магистральный путь решения проблемы выветривания и других задач учения о россыпях. Однако ограниченность нашего рассмотрения затронутых проблем рамками книги позволяет коснуться из всего комплекса геологических условий главным образом литогенетических факторов россыпеобразования и лишь в малой степени — особенностей их проявления в связи с тектоно-геоморфологической эволюцией металлогенетических зон.

### ГЛАВА III

## ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ РОССЫПЕЙ

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Литогенетические факторы и условия формирования россыпных месторождений включают такие особенности, свойства или параметры осадкоформирующей среды, сочетание или взаимодействие которых разрешает накопление россыпеобразующих минералов в данной среде. В энергетическом смысле литогенетический процесс есть выражение тенденции к выравниванию на земной поверхности масс обломочного материала и его распределению в гравитационном поле. При более детальном рассмотрении и на совершенно ином энергетическом уровне литогенетический процесс есть не что иное, как отдельные элементарные физико-химические взаимодействия, явления и механизмы, интегрированные в масштабе геологического времени. При рассмотрении физико-химических условий, при которых происходит разрушение коренных источников в зоне гипергенеза, мы исходили из представления о неподвижности, фиксированности россыпеобразующих минералов в разрушающейся физико-химической системе. Разрушающаяся часть рудной системы представлялась, напротив, подвижной, уменьшающейся по массе и объему за счет выноса продуктов выветривания. Очевидно, что такие условия существуют какое-то время при формировании только одного типа россыпей — элювиальных. В реальных геологических ситуациях продукты выветривания находятся в сложном движении на склоне, в сфере руслового потока, в зоне пляжа и т.д. При этом формируется целый спектр континентальных отложений, различающихся индивидуальными особенностями формирования (и тогда мы говорим о генетическом типе отложений), разнообразными переходами, фаціальными разновидностями и т.д. Во всем этом сложном и многообразном процессе россыпеобразующие минералы оказываются вовлеченными в миграцию, испытывают рассеяние или концентрацию в процессах осадочной дифференциации.

Таким образом, для понимания поведения россыпеобразующих минералов в процессах континентального осадкообразования мало знать

закономерности формирования континентальных отложений, необходимо знать еще и закономерности и причины дифференциации минералов как в локальной седиментационной ситуации, так и в общей эволюции терригенного материала от областей мобилизации до зон транзита и седиментации. Следовательно, теория россыпеобразования должна опираться не только на теорию континентального литогенеза, но и на геохимическую теорию, в частности на учение о полях концентрации и рассеяния. В соответствии с геохимическими представлениями миграционные свойства элементов находятся в зависимости от внешних электронных орбит атомов и свойств кристаллической решетки минералов. Однако эта связь, теоретически мыслимая вполне конкретно, в действительности может быть выражена в виде тех или иных соотношений только после проведения обширных экспериментальных и геологических исследований. Поэтому, рассматривая литогенетические условия россыпеобразования, мы вынуждены многие вопросы трактовать с общих позиций и только в сфере руслового процесса попытаться перечислить некоторые конкретные параметры, регулирующие процессы миграции и концентрации россыпеобразующих минералов.

С общих позиций процесс миграции россыпеобразующих минералов можно рассматривать, опираясь на представление об энергетических уровнях морфолитогенетических процессов. Очевидно, что на первом и втором энергетических уровнях история россыпеобразующих минералов совершенно неразличима на фоне планетарных процессов морфоструктурного и магматического развития Земли. Можно было бы говорить лишь о синхронном этим процессам формировании планетарных металлогенетических и рудных зон, а в дальнейшем — регионально развитых поверхностей выравнивания. Однако наиболее доступным для реального анализа процесса россыпеобразования может являться единичное рудное тело с чертами определенной формационной принадлежности. Проследившая судьбу гипогенных минеральных ассоциаций, содержащихся в рудном теле, от зоны выветривания и высвобождения минералов до их транспортировки водным потоком, нетрудно заметить, что их способность накапливаться зависит от их антимиграционных свойств. В литогенетическом и геохимическом смысле россыпеобразующие минералы являются антимигрантами. Таким образом, россыпеобразование в литогенетическом смысле можно рассматривать как диалектическое единство двух противоречивых тенденций — тенденции к миграции, выносу обломочного материала и переходу его в наиболее равновесное состояние с гравитационным полем и тенденции к сохранению состояния покоя. Именно анализируя противодействие этих двух тенденций, мы сталкиваемся с проявлением отмечавшихся А.А. Садуковым [139] гравитационных свойств атомов в экзогенных процессах. Масса атома наряду с энергией кристаллической решетки минералов и их кристаллохимическими свойствами оказывается важной мерой миграционной способности минералов, образуемых данными атомами. Поскольку на каждый атом вещества действует всемирное тяготение с силой, пропорциональной

массе и обратно пропорциональной квадрату расстояния, то элементы с большой массой атома оказываются обладающими большей инерцией покоя, чем остальные компоненты осадка.

Однако независимо от массы атома и связанных с этим антимиграционных свойств любые скопления элементов, вплоть до крупных самородков, неизбежно оказываются вовлеченными в зоне гипергенеза в те или иные пространственные перемещения. В геологии россыпей не всегда учитывается, что миграция россыпеобразующих минералов происходит не только в водном потоке, но и в результате ряда других процессов. Очевидно, что, говоря о миграции россыпеобразующих минералов, необходимо выделять прежде всего эволюционную, или геологическую, миграцию. Сущность этого вида миграции в том, что, оказавшись в зоне гипергенеза, россыпеобразующие минералы могут испытывать воздействие многочисленных факторов. Каждый из факторов обуславливает незначительное миграционное действие, но в сумме они могут дать значительный эффект. Можно представить ситуацию, когда при размыве рудного месторождения крупный самородок золота или платины, совершенно не перемешаемый водным потоком, будет тем не менее за время эволюции речной долины перемещаться вместе со склоновым материалом, залегать то в русле водотока, то на террасе, снова опускаться на более низкий энергетический уровень при размыве террасы и т.д. Очевидно, что в этом частном случае следует говорить о геоморфологической миграции.

Наконец, наиболее обычной формой миграции россыпеобразующих минералов является гидрологическая миграция, т.е. перемещение вместе с массой осадка, приводимого в движение течением реки. Но и в этом случае в водно-аллювиальной среде развиваются сложные процессы, обуславливающие различные механизмы концентрации, казалось бы, в весьма сходной седиментационной обстановке. Таким образом, главная идея, которой, на наш взгляд, следует руководствоваться при подходе к выяснению литогенетических условий россыпеобразования, состоит в том, чтобы, во-первых, видеть весь процесс россыпеобразования в его неразрывном единстве от начальных до конечных стадий и, во-вторых, отчетливо представлять, что процессы формирования осадка вообще и россыпеобразования в частности не адекватны, что они представляют собой процесс в процессе, один из которых направлен на удаление материала из среды осадкообразования, а другой — на сохранение в неприкосновенности концентраций россыпеобразующих минералов. Рассмотрим главные черты начальных звеньев россыпеобразования.

#### ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ЭЛЮВИАЛЬНО-ДЕЛЮВИАЛЬНОГО ПРОЦЕССА

При характеристике физического выветривания мы касались некоторых особенностей формирования элювиальных отложений. Сравнительное изучение водораздельных, склоновых и аллювиальных отложений проводилось нами ранее в полевых условиях [214], а экспериментально изучался процесс размыва склона струйчатыми потоками [219]. Принимая во внимание, что склоновый процесс пред-

ставляет собой самостоятельную геоморфологическую проблему [26, 117], мы ограничимся изложением некоторых общих соображений, вытекающих из результатов экспериментальных исследований.

Элювиальные отложения в генетическом отношении принадлежат к наиболее чистой линии генетических типов континентальных отложений в том смысле, что элювий формируется под воздействием вполне определенных факторов и редко искажается наложением процессов иного генетического содержания (например, эоловым навеванием, карстовыми явлениями и др.). В энергетическом отношении элювий также испытывает действие минимального количества приходящей энергии, которая расходуется на диспергацию первичных горных пород или рудного материала. Поэтому элювий часто обладает, особенно в высоких широтах, простейшим гранулометрическим спектром с одним выраженным максимумом в области наиболее грубых фракций. При прослеживании с севера на юг в элювии увеличивается глинистость, содержание фракций песчаной и дресвяной размерности, возрастает мощность, однако принципиальные особенности его строения сохраняются.

Отложения склонового ряда отличаются от элювия (а с другой стороны, и от аллювия) прежде всего гетерогенностью. В их формировании ведущую роль играют гравитационные силы, однако диапазон проявления этих сил весьма широк — от солифлюкционного квазиламинарного течения материала до мгновенных обрушений колоссальных масс обломочных отложений. Именно эта полицикличность склоновых образований объективно обуславливает терминологическую пестроту, вызванную попытками найти соответствующие обозначения для многочисленных генетических разновидностей осадков, встречающихся на склоне.

Для практических приложений, в частности при обсуждении проблем россыпеобразования, вполне целесообразно не пытаться индивидуализировать разнообразные морфолитогенетические процессы и явления на склоне, а рассматривать весь склоновый комплекс как целостное геологическое образование, имеющее вполне выраженный фациальный и литогенетический облик. Такой подход был намечен Н.А. Шило [197], предложившим отложения склонового ряда обозначать как делювиальные или делювиально-солифлюкционные, а россыпные концентрации, встречающиеся в этих отложениях, относить к генетическому типу того же названия. Такая трактовка склоновых отложений выглядит удобной и для интерпретации литогенетических условий формирования россыпных проявлений в делювии.

Одним из немногих, если не единственным процессом, одинаково развивающимся в элювии и делювии, является процесс физического разрушения руд и горных пород и соответствующие этому процессу механизмы дезинтеграции обломочного материала. Как вытекает из всего сказанного выше, механизм разрушения не может идти на склоне как-то иначе, чем на водоразделе или в речном русле. Варьировать может скорость распада, могут несколько меняться соотношения термоциклических, ударных или статических факторов разрушения, могут различно вести себя продукты выветривания:

растворяться, выноситься или накапливаться. Однако механизм физического распада горных пород и руд останется при этом неизменным. Следовательно, обусловливаемое физическим дроблением и диспергированием руд высвобождение россыпеобразующих минералов происходит на склоне точно так же, как на водоразделе или в русле потока. Естественно, что потенциальная возможность высвобождения ценных минералов из первичных руд на склоне увеличивается. Дисперсность обломочной системы нарастает здесь за счет большего количества энергетических факторов, приводящих к дополнительному дроблению материала при движении склоновых масс (см. рис. 20). Впрочем, следует заметить, что высказываемые соображения о большей диспергации склонового материала по сравнению с элювием справедливы только в том случае, если склон пополняется материалом за счет элювия. Нередко сам склон представляет собой арену активной переработки коренного основания склона. В этом случае, особенно если процесс идет быстро, склоновый комплекс будет включать и заметное количество грубообломочного материала.

В целом же нестабильность склоновых масс, затрудненность их дифференциации по вещественному составу и другие факторы обуславливают тенденцию к рассеянию ценных минералов в делювии и затрудняют процесс россыпеобразования на склоне. Однако встречающиеся делювиальные россыпи указывают на россыпеобразующую функцию склонового процесса, хотя иногда могут означать тот факт, что склоновые процессы не успели уничтожить россыпные концентрации элювиального или аллювиального генезиса. Следовательно, поиски россыпей на склоне представляют хотя и далеко не безнадежную задачу, однако производиться они должны на основе четких представлений о сущности делювиальной стадии в общей эволюции процессов россыпеобразования.

#### ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЛЛЮВИАЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Литогенетические факторы и механизмы россыпеобразования, действующие в речном русле, рассматриваются нами на основе представления о водно-аллювиальной среде, введенного Н.А. Шило [196]. Водно-аллювиальная среда в образовании аллювиальных россыпных концентраций несет ту же генетическую функцию, какую выполняет среда рудоотложения в возникновении эндогенных форм концентрации минералов. Следовательно, сколько-нибудь удовлетворительное объяснение процессов концентрации минералов в водно-аллювиальной среде должно исходить из не менее детального и корректного рассмотрения физико-химических условий данной среды, чем это достигнуто в отношении эндогенного рудообразования. Именно отсутствие такой детальности ведет к противоречивости представлений о дальности транспортировки и способах концентрации россыпеобразующих минералов в водно-аллювиальных условиях.

Говоря о водно-аллювиальной среде как физико-химической системе, необходимо сделать несколько допущений. В частности, на данной стадии исследований приходится исходить из предположения,

что явления электрокинетического растворения при трении минералов, электромагнитные взаимодействия частиц различной крупности и другие, химические явления не играют главной роли в процессах россыпеобразования. Они могут быть выражены достаточно заметно [39, 108], однако занимают явно подчиненное положение по отношению к сугубо физическим факторам поведения минералов в водной среде. Поэтому мы не будем в дальнейшем касаться роли химических факторов, полагая, что в будущем их изучение займет важнейшее место при исследовании проблемы тонких минеральных фракций ценных компонентов аллювия и других генетических типов отложений.

### Гидрологические параметры водно-аллювиальной среды

Для суждения о принципиальных гидрологических особенностях водотоков, в долинах которых размещаются россыпи, проанализированы данные метеостанций всего Северо-Востока СССР и Камчатки за весь период систематических наблюдений. Все водотоки сгруппированы в классы в зависимости от площади водосбора, после чего на ЭВМ вычислены средние паводковые значения основных гидрологических параметров русла, среднеквадратичные отклонения в каждом ряду замеров, коэффициенты вариации и корреляции параметров внутри классов и между классами. Установлено, что скорости течения в паводок в реках различной глубины, ширины и площади водосбора изменяются в небольших пределах (табл. 34). Этот факт, имеющий важное значение для интерпретации россыпеобразующей функции русла, обусловлен, по-видимому, тем, что максимальная скорость течения устанавливается в зависимости от вязкости воды, характера шероховатости дна, глубины потока и т.д., но не может превысить некоторых предельных значений. Этот предел скорости на отдельных участках русла может колебаться, но его среднестатистическая величина для разных рек оказывается весьма сходной.

Режим рек в паводок характеризовался критериями деления их на равнинные и горные [86, 183]. При этом выяснилось, что многие водотоки не достигают достаточной кинетичности, чтобы их уверенно можно было отнести к типично горным потокам, хотя они и протекают в пределах низко- и среднегорного рельефа. По статистическому ряду наблюдений к горному типу могут быть бесспорно отнесены только потоки малых классов, т.е. имеющие площадь водосбора 0–10 км<sup>2</sup>. Для оценки кинетичности потоков вычислялись значения числа Фруда для максимальных значений расходов и скоростей в ряду замеров каждого класса по формуле

$$Fr = \frac{V_{\text{макс}}}{gH_{\text{макс}}}, \quad (8)$$

где  $V_{\text{макс}}$  – максимальная скорость течения, зафиксированная в сечении гидроствора;  $H_{\text{макс}}$  – максимальная глубина в том же сечении. По результатам вычислений числа Фруда произведен подсчет числа случаев в общем ряду замеров, когда поток достигал режима

10. Зак. 757 145

Таблица 34

Средние из максимальных (паводковых) значений измеренных 1927-1976 гг.)

Класс рек	Русловой параметр*		
	S	Q	R
I	6,4	1,77	1,21
II	13,7	4,09	2,62
III	28,7	7,8	5,61
IV	57,4	14,70	9,08
V	111,7	29,6	14,0
VI	239,0	41,6	26,60
VII	406,7	57,2	31,00
VIII	1070,0	147,8	76,3
IX	1740,0	253,00	124,7
X	3664,5	398,3	192,7
XI	7871,6	778,8	360,0
XII	12588,8	1152,6	543,9
XIII	28824,0	2472,4	1146,5
XIV	76151,5	4423,1	1937,5
XV	334644,0	13910,0	9247,0

\* S - площадь водосбора, км<sup>2</sup>; Q - измеренные расходы, м<sup>3</sup>/с; R - площадь водного сечения, м<sup>2</sup>;  $V_{cp}$  - скорость средняя по сечению, м/с;  $V_{макс}$  - максимальная скорость течения, м/с;

бурного течения. Выяснилось, что вероятность бурного режима течения является наибольшей в небольших долинах (I и II классы) и быстро уменьшается при увеличении площади водосбора (табл. 35).

Для оценки поведения россыпеобразующих минералов имеет существенное значение величина вертикальной составляющей скорости. Эти величины рассчитаны по соотношениям, используемым в гидромеханике [98], для рек различных классов (табл. 36). Таким образом, в результате обработки гидрологических характеристик современных речных систем обширного региона получены данные, характеризующие гидрологические условия современной физико-географической обстановки Северо-Востока. Судя по геологическим материалам, полученным нами для типичных районов Северо-Востока [105], ландшафтно-климатическая обстановка в этом регионе на протяжении верхнего плейстоцена сходна с современной. Об этом же свидетельствуют данные Ю.И. Гольдфарба [33] по бассейну Колымы и результаты многих других исследователей. Следовательно, можно полагать, что полученные для современных водотоков гидрологические характеристики в их среднестатистическом значении сравнимы с параметрами рек, формировавших россыпные месторождения на этой территории.

параметров рек Северо-Востока СССР (Гидрологические ежегодники,

Русловой параметр

$V_{\text{ср}}$	$V_{\text{макс}}$	$h_{\text{ср}}$	$H_{\text{макс}}$	$I$
1.41	2,13	0,33	0,38	22,0
2,53	2,51	0,19	0,68	15,0
1,52	2,42	0,57	0,85	11,0
1,50	2,36	0,55	0,92	7,0
1,71	2,70	0,68	1,18	6,0
1,50	2,31	0,97	1,60	4,0
1,79	2,62	0,99	1,50	3,0
1,91	2,92	1,39	2,06	3,0
2,05	2,94	1,56	2,51	2,0
1,55	2,93	1,90	2,84	2,0
2,06	2,88	2,46	4,12	1,0
2,00	2,70	3,08	4,66	1,0
2,28	3,11	5,28	6,51	1,0
2,26	2,90	5,34	7,27	0,6
1,58	2,16	7,00	8,41	0,1

$h_{\text{ср}}$  - средняя глубина русла, м;  $H_{\text{макс}}$  - максимальная глубина русла, м;  $I$  - уклон поверхности воды, м/км.

Таблица 35

Соотношение состояний бурного и спокойного течения в водотоках различных классов

Класс водотока	Общее число замеров	Число замеров со значением $Fr > 1$ (горный тип потока)	% замеров со значениями числа $Fr > 1$
I	127	60	47,3
II	119	56	47,1
III	134	38	28,4
IV	127	23	18,1
V	112	4	3,7
VI	120	12	10,0
VII	120	2	1,7
VIII	115	-	-
IX	93	-	-

Таблица 36

Вертикальная составляющая скорости в водотоках разных классов

Класс рек	Средняя глубина русла, м	Максимальная глубина русла, м	Уклон русла, м/км	Среднеквадратичные значения вертикальной составляющей скорости, м/с
I	0,33	0,38	22	0,280
II	0,45	0,68	15	0,270
III	0,57	0,85	11	0,260
IV	0,55	0,92	7	0,204
V	0,68	1,18	6	0,210
VI	0,97	1,60	4	0,208
VII	0,99	1,50	3	0,179
VIII	1,39	2,06	3	0,212
IX	1,56	2,51	2	0,184
X	1,90	2,84	2	0,203
XI	2,46	4,12	1	0,164
XII	3,08	4,66	1	0,183
XIII	5,28	6,51	1	0,240
XIV	5,34	7,27	0,6	0,186

Выборочное сравнение некоторых рек Северо-Востока с реками Средней Азии, Урала, Кавказа показывает, что по своим гидрологическим особенностям они вполне сравнимы. Процессы дифференциации в водотоках различных классов не зависят от климатических зон, а определяются исключительно гидрологическими свойствами водно-аллювиальной среды. В руслах рек с близкими гидрологическими параметрами дифференциация аллювия подчиняется одним и тем же закономерностям [83].

#### Литологические параметры водно-аллювиальной среды

Под литологическими параметрами водно-аллювиальной среды нами понимается петрографический и гранулометрический состав обломочного материала, выстилающего речное дно, а также рельеф коренного ложа долины. Следует заметить, что в целом водно-аллювиальная среда является сложной гидродинамической системой, в которой одновременно часть материала удаляется, часть привносится извне, некоторое количество обломочных частиц продуцируется в самой системе и происходит дифференциация компонентов осадка по гидравлической и геометрической крупности и минералогическому составу. Быстрая фациальная изменчивость аллювия в поперечном и продольном, по отношению к долине, направлении и в разрезе, ритмичность наслоения материала разного состава и слабая исследованность аллювия достоверными литологическими методами — все это на данном этапе делает довольно трудной задачу детального лито-

логического расчленения аллювия, хотя именно такой подход, как это подчеркивается Е.В. Шандером [189], является необходимым условием окончательного выяснения механизма накопления ценных минералов в водно-аллювиальной среде. В соответствии с задачами нашего исследования необходимо выделить такие свойства водно-аллювиальной среды, которые определяли бы турбулентную структуру водного потока и микрорельеф речного дна. Этим требованиям отвечает гранулометрический состав обломочного материала.

Ранее нами были выделены [212] 4 типа аллювия, наиболее часто встречаемые в речных долинах Северо-Востока в разнообразных сочетаниях. Для каждого из вариантов вычислены гранулометрические коэффициенты (рис. 34). Совершенно ясно, что столь четкого реального разделения аллювия на типы не существует и предлагаемое деление отражает лишь случайное, или стохастическое, распределение многочисленных вариантов гранулометрического состава аллювия относительно некоторого среднего, выделяемого в качестве литологического типа. Реальная проба почти всегда будет представлена сочетанием выделенных типов аллювия, более или менее приближающимся к какому-нибудь из них. Тем не менее предлагаемое деление совершенно необходимо, так как позволяет гипотетические суждения о водно-аллювиальной среде свести к количественному геолого-аналитическому исследованию [210, 212]. Такое деление оказалось пригодным и для более широкой типизации аллювиального осадка [97].

Коренные породы речного ложа, или так называемый плотик россыпных месторождений, также являются одним из литологических параметров. Такие особенности плотика, как трещиноватость, глубина и ориентировка трещин, подверженность карстовым процессам, устойчивость к механическому воздействию, имеют немаловажное значение, либо облегчая миграцию минералов, либо препятствуя ей. В теоретическом отношении роль плотика и его особенностей аналогична присутствию крупного материала в аллювии, создающего повышенную шероховатость речного дна. Следует отметить также роль петрографического состава аллювия. Если в обломочном материале преобладают осадочные породы, особенно терригенные (глинистые сланцы, песчаники), то аллювий нередко насыщается дополнительным количеством глинистого или песчаного материала, высвобождающегося из галечного материала при гидромеханическом истирании. Аллювий, состоящий из магматических пород, менее глинистый и более насыщен крупнообломочным материалом. Тип плотика необходимо учитывать, однако влияние этого фактора иногда излишне преувеличивается, особенно когда считается, что гладкий ровный плотик способствует беспрепятственному перемещению россыпеобразующих минералов. Такие случаи сравнительно редки, в действительности коренное днище долины всегда изобилует разнообразными неровностями, в которых может происходить накопление россыпеобразующих минералов. Поэтому плотик с незначительной шероховатостью может привести лишь к местному, сугубо локальному перераспределению ценных минералов на коренном ложе долины. Говоря

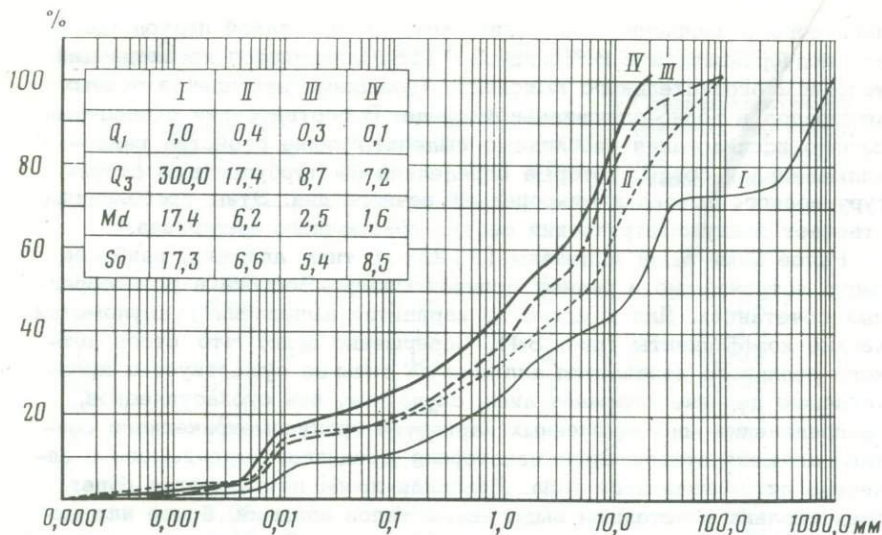


Рис. 34. Кумулятивные кривые и гранулометрические характеристики различных типов аллювия на Северо-Востоке СССР

*I* – весьма неоднородный аллювий водотоков *I–III* порядков (и более высоких порядков при наличии местного поступления материала); *II–IV* – различные типы аллювия в водотоках четвертого, пятого и более высоких порядков. *I* тип характеризуется накоплением только с помощью гравитационно-диффузионного механизма концентрации; *II* и *III* – сочетанием миграционно-остаточного и диффузионного механизмов; *IV* – преобладанием миграционного механизма концентрации  $Q_1$  и  $Q_3$  – первая и третья квартили;  $Md$  – медианный диаметр;  $S_0$  – коэффициент сортировки

о литологических параметрах водно-аллювиальной среды, необходимо отметить одно немаловажное обстоятельство, связанное с климатической зональностью. В работах И.П. Карташова, А.А. Чистякова, Ю.А. Лаврушина климатический фактор формирования аллювия рассматривается как существенный, но не меняющий схемы строения аллювия, хотя соотношение основных фаций в строении аллювиальных свит может несколько меняться. Если же проанализировать зональные отличия в литологическом облике аллювия, то здесь вопрос не решается столь однозначно.

Проведенное нами детальное изучение аллювия р. Чаун (бассейн Восточно-Сибирского моря), р. Ойра (бассейн Охотского моря) и р. Самарга (бассейн Японского моря) приводит к выводу, что в формировании аллювия высокоширотных рек значительное место принадлежит криогенной деструкции аллювия, поступлению к руслу избыточных масс склонового материала и явлению агградации [205]. В высоких широтах реки не отличаются большими значениями скоростей течения в паводки даже при значительных уклонах коренного ложа.

Это связано с тем, что реки полностью или частично промерзают в зимний период, а это влечет за собой несколько повышенную сопротивляемость аллювия поймы эрозионному воздействию весенних паводков по сравнению с условиями типично гумидной зоны. Для русловых систем в зоне вечной мерзлоты характерна многорукавность, возникающая при заполнении русла крупнообломочным, нередко глыбовым материалом. Из 100-дневной продолжительности свободного от льда руслового стока в течение 50-90 дней речные потоки оказываются относительно маломощными и неспособными произвести работу по переформированию речных русел, сложенных материалом повышенной крупности. Поток обтекает скопления наиболее крупного материала на дне долины и в русле и лишь частично вымывает и перемещает подвижные фракции аллювия, образуя неглубокие рукава и протоки, а живая сила реки часто рассеивается по всему днису долины.

Присутствие крупнообломочного материала коренным образом видоизменяет структуру поля скоростей в потоке. Скорость течения уменьшается в силу повышенной шероховатости дна и высокого коэффициента сопротивления дна движению воды. Как показал Р.С. Чапов [183], возникает несоответствие между уклоном и ожидаемой скоростью течения: в связи с отмеченными причинами скорость течения оказывается значительно меньшей, чем это следует ожидать при данном уклоне, и поток сохраняет спокойное течение при уклонах больше критических. Расходы воды и скорости течения в весенний паводок в северных реках не нарастают катастрофически быстро, что связано с замедленностью снеготаяния в высоких широтах [86]. Анализ статистических данных по рекам Северо-Востока СССР показывает, что многократное увеличение расходов воды в паводок сопровождается сравнительно небольшим увеличением скорости течения. Причем не выявляется связь между скоростью течения, площадью водосбора, расходами воды или какими-либо другими характеристиками водного потока. Имеющиеся колебания от класса к классу (см. табл. 34) довольно невелики и не имеют тенденции закономерно возрастать или уменьшаться в зависимости от размеров долины. Поэтому такие колебания не могут рассматриваться в качестве фактора, меняющего россыпеобразующие свойства водотоков различных размеров в такой степени, чтобы этим можно было объяснить различия в продуктивности долин разных порядков.

Аллювий горных и горно-равнинных рек Кавказа, Средней и Южной Азии по многим своим чертам сходен с аллювием горных и полугорных рек Северо-Востока. Следует полагать, что для горного аллювия основным энергетическим фактором формирования является кинетическая энергия руслового потока, выполняющая интенсивное гидромеханическое дробление обломочного материала. Помимо данных А.А. Чистякова [186] по среднеазиатским рекам, нами проанализированы широтные изменения в строении аллювия названных выше рек (Чаун, Ойра, Самарга). Выявленные отличия, которых мы коснемся ниже, не являются определяющими для заметных отклонений в процессах дифференциации аллювия. С этой точки зрения аллювиальный процесс является аazonальным, регулируемым только степенью кинетичности водотока.

## О связи гидрологических и литологических параметров русла

Для поведения аллювия в водном потоке основное значение имеет степень его однородности. Известно, что при неоднородной зернистости осадка захват зерен движущейся водой начинается при скоростях течения, отвечающих захвату зерен низшего класса, находящегося в смеси, а сплошное влечение — при скоростях, отвечающих захвату самых крупных частиц [5, 234]. В геологии россыпей существует поразительная нечеткость представлений о поведении аллювия в водном потоке. Например, Ю.А. Билибин [9, с. 110] приводит соотношение крупности аллювия и скорости течения, необходимой для перемещения обломочного материала, совершенно не учитывая при этом влияния глубины потока. В.П. Батурич со ссылкой на Твенхофела [5, с. 129] для тех же самых значений скорости потока, что и в работе Ю.А. Билибина, указывает совершенно иные показатели крупности перемещаемого материала (рис. 35). Вопрос о скоростях течения, приводящих в движение материал различной крупности, не решен однозначно и в гидрологии. Об этом свидетельствуют, в частности, расхождения в данных разных авторов о скорости смыва частиц различной крупности и неразмывающихся скоростях течения (рис. 36).

Анализ этих данных и наших натуральных наблюдений позволяет сделать вывод, что для приведения в движение материала крупнее 100 мм необходимы средние скорости течения, превышающие 2 м/с (от 2,2 м/с по Г.И. Шамову до 3,25 м/с по Ю.А. Билибину), при сохранении некоторой постоянной глубины потока. Для приведения же материала такой крупности в состояние сплошного влечения указанные скорости необходимо увеличить еще в 1,3 раза [187]. Следовательно, для перемещения материала такой крупности (>100 мм) требуются скорости 2,86–4,16 м/с. Если эти скорости потоком не достигаются, то крупные обломки в русле перемещаться не будут, создавая постоянную естественную шероховатость дна потока. Вместо движения материала в виде некоторого слоя, как это себе представлял Ю.А. Билибин, при определенных условиях может иметь место пульсирующее, дискретное перемещение порций аллювия из одного углубления между более крупными обломками в другое. Приведенные данные действительны, если глубина потока постоянна и

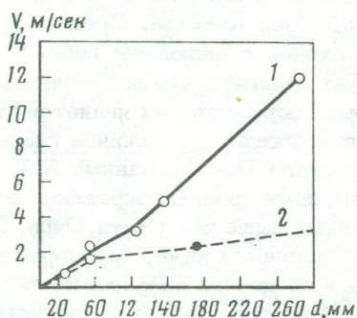


Рис. 35. Предполагаемые соотношения скорости потока и крупности перемещаемого материала по Ю.А. Билибину (1) и В.П. Батуричу (2)

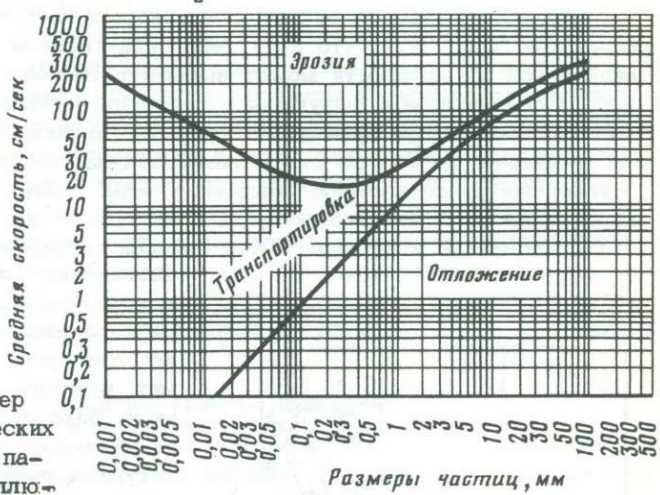
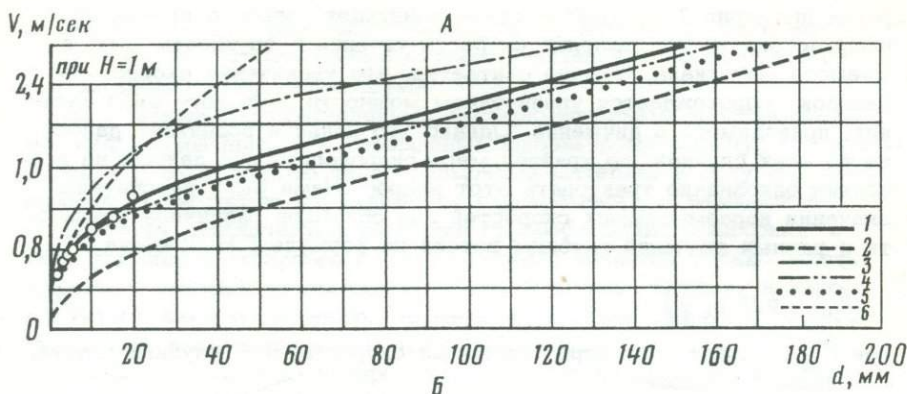
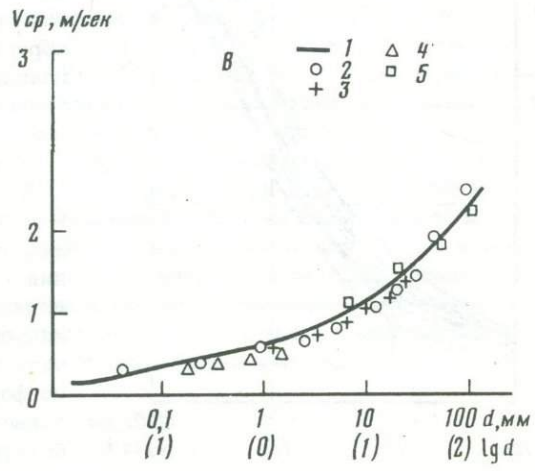


Рис. 36. Характер связи гидрологических и литологических параметров водно-аллювиальной среды

А - предельные скорости смыва частиц:  
 1 - по Шамову, 2 - по Великанову, 3 - по Леви, 4 - по Гвелисиани, 5 - по Гончарову, 6 - по Эри-Санжену;  
 Б - то же - по Хьюлстрему;  
 В - неравномерные скорости равномерного потока при  $H=1 \text{ м}$ : 1 - по Никитину, 2 - стандарт Главгидростроя СТ-24-4396, 3 - по Шамову, 4 - по Кнороз, 5 - данные автора



равна примерно 1 м. В этой связи возникает вопрос о влиянии глубины потока на соотношение скорости течения и крупности перемещаемого материала. Обычно считается, что увеличение скорости в паводок сопровождается увеличением мощности активного слоя аллювия, приводимого в движение. Однако это явление возникает далеко не во всех случаях, по крайней мере гидрологические данные не позволяют однозначно трактовать этот вопрос. Нами были рассчитаны значения неразмывающих скоростей для обломков различной крупности и разных значений глубины потока по формуле Г.И. Шамова

$$V_{\text{пр}} = 6,0 \cdot d \left( \frac{H}{d} \right)^{1/6}, \quad (9)$$

где  $V_{\text{пр}}$  - предельная неразмывающая скорость;  $H$  - глубина потока;  $d$  - диаметр аллювия.

Сравнение расчетных данных с данными А.И. Чеботарева [184] показывает (рис. 37), что при увеличении глубины потока материал одной и той же крупности может выдерживать большие скорости течения. Следовательно, бытующая в геологии россыпей идея о том, что паводковые воды приводят в движение активный слой наибольшей мощности, далеко не столь аксиоматична, чтобы строить на ней достоверные представления. Заметим в этой связи, что и в области специальных наук этот вопрос имеет дискуссионный характер. Одни исследователи утверждают, что паводок сопровождается резким увеличением донных скоростей и изменениями рельефа

речного дна. Другие отмечают, что существенных перемен в эпюре скоростей в момент пикового расхода воды не наблюдается. Тщательные натурные наблюдения показали, что переформирование дна наблюдается, если аллювий представлен однородным сортированным материалом гравийной размерности. В этом случае при увеличении

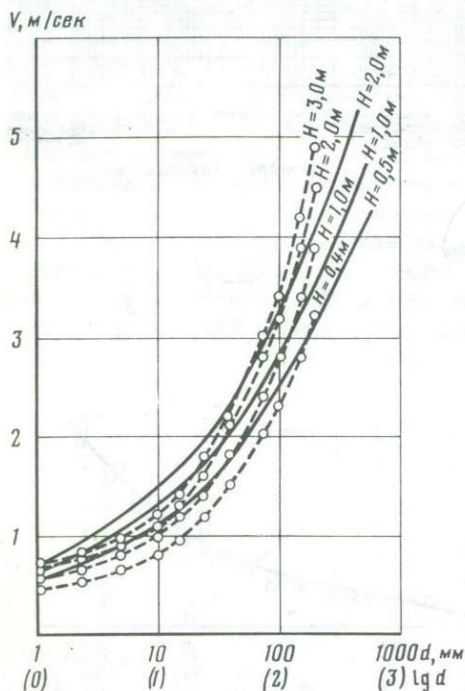


Рис 37. Рассчитанные предельные скорости для приведения в движение аллювия различной крупности ( $d$ ) при различной глубине потока (расчеты автора: сплошные линии - по формуле Г.И. Шамова, штриховые - по формуле А.И. Чеботарева)

расходов воды в 5 раз против обычного придонная скорость может возрастать до 25% при соответствующей активации процессов в придонной области [89, 171, 172].

На основании многочисленных экспериментальных и теоретических данных мы пришли к совершенно однозначному выводу, что имеющийся в руслах горного типа обломочный материал в силу его неоднородности не может перемещаться одновременно, а паводковые скорости не обеспечивают движения грубообломочного аллювия в виде сплошного активного слоя. Подвижной является только часть обломков, которые стремятся оставить "постель" аллювия и переместиться ниже по течению. По мере нарастания скорости течения дно потока становится все более шероховатым, резко повышается сопротивление течению и турбулентность потока. Эта закономерность была замечена В.В. Ламакиным и положена им в основу выделения остаточно-речных, или перлювиальных, отложений [72 и др.], представленных наиболее крупными фракциями обломочного материала, остающимися на месте залегания и нередко лучше сортированными за счет выноса более мелкого материала. Количество перлювиального материала может достичь таких объемов, что полностью прекратится размывание дна, хотя река и не потеряла своей энергии. Представление об остаточно-речных отложениях дает наиболее верную основу для понимания генетического механизма формирования аллювиальных месторождений. Это представление хорошо согласуется также с принципом энергетической обусловленности литогенетических процессов в сфере речного русла.

#### ПОВЕДЕНИЕ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДНО-АЛЛЮВИАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Вопросами поведения рудного материала при переносе в водном потоке занимались многие исследователи. Полученные данные позволяют с определенной достоверностью оценивать проходимые расстояния в русловом потоке рудными обломками [150] или галечным материалом различного состава [142, 125], а также частями песчаной размерности [120]. Критерием пройденного расстояния служит обычно изменение формы или потеря массы обломка. В свете поставленных нами задач вопрос о поведении рудного вещества, в частности россыпеобразующих минералов, должен быть рассмотрен несколько с иной точки зрения. Для понимания литогенетических условий россыпеобразования наиболее важно знать механизмы, управляющие поведением водно-аллювиальной среды и ведущие к образованию самого аллювиального осадка с присущим этому осадку минералогическим и гранулометрическим составом. Именно в этом направлении проводились наши экспериментальные исследования и анализировался геологический материал.

## Принципиальная схема взаимодействия компонентов водно-аллювиальной среды

Принципиальная схема поведения минеральных частиц, в частности золота, в водно-аллювиальной среде обоснована ранее [196, 212] материалами полевых наблюдений, изучения работы обогащательных устройств, экспериментальных исследований. Ее сущность сводится к тому, что, попадая на дно потока, зерно минерала имеет наибольшую вероятность оказаться в углублении между более крупными обломками аллювиальной "постели". Это обусловлено смывающим действием потока и меньшей площадью выступов в речном дне по сравнению с площадью пространства между выступами. Следовательно, уже при первом попадании зерна минерала в водно-аллювиальную среду происходит первичная дифференциация в массе аллювия: частицы ценных минералов попадают между более крупными обломками, обособляясь в том классе фракций, который соответствует размеру ценных минералов. Оказавшись в углублении, зерно минерала выходит из сферы прямого воздействия потока и может находиться в покое сколь угодно долго. Оно может быть извлечено из углубления только под действием вертикальной составляющей скорости потока. Находясь в состоянии покоя, зерно ценного минерала обладает определенной потенциальной энергией. Импульс вертикальной составляющей должен обладать такой силой, чтобы преодолеть инерцию покоя частицы и придать ей ускоренное движение вверх. Для оценки степени подвижности частицы обычно используется значение ее гидравлической крупности, т.е. скорости свободного падения в воде [84]. Отметим, что названные критерии поведения минералов в водно-аллювиальной среде являются достаточно признанными и в той или иной степени учитываются при анализе специальных вопросов россыпеобразования [5, 196, 151]. Таким образом, первичную дифференциацию минеральной частицы в водно-аллювиальной среде определяют три параметра: геометрические размеры частицы по отношению к размерам частиц аллювия; гидравлическая крупность минерального зерна; вертикальная составляющая скорости водного потока.

Рассмотренная принципиальная схема носит статический характер применительно к случаю недеформируемого дна. В естественных потоках дно является деформируемым, а процесс изменения морфологии дна зависит от глубины потока и скорости течения. В определенных случаях дно остается недеформируемым, хотя в пространствах между наиболее крупными обломками происходят активные процессы дифференциации более мелкого материала, обуславливаемые турбулентной структурой потока. Поступление минерального зерна сверху на дно потока является не единственным способом привноса ценных минералов. Возможны варианты поступления со стороны дна, с верхнего по течению участка на более нижний и т.д. Однако все эти частные варианты подчинены действию трех перечисленных выше факторов, определяющих поведение минерального зерна. Взаимодействие этих факторов проявляется через динамическую структуру потока.

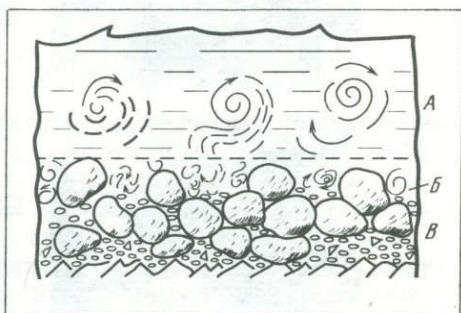
## Турбулентная структура водного потока

Принятая современной гидрологией спектральная теория турбулентности в водном потоке [20] основана на разложении турбулентных пульсаций скорости в толще потока на спектр частот. Это означает, что водный поток обладает сложной турбулентной структурой, состоящей из макро-, мезо- и микропульсаций и вихрей, непрерывно, одновременно и разнонаправленно взаимодействующих в водной массе потока. Ранее нами [106] подробно рассмотрены зависимость гранулометрического спектра аллювия и степени совершенства его сортировки от структуры потока. Выяснилось, что геологические данные хорошо согласуются с представлениями гидромеханики и с теорией спектральной структуры турбулентности.

По И.К. Никитину [98], турбулентную структуру потока определяют пульсации двух масштабов: пульсации с масштабом, равным глубине потока, доминирующие во всей толще основного турбулентного ядра течения и в придонном слое по своим значениям близкие к нулю; пульсации с масштабом, равным толщине придонного слоя, составляющие большую часть энергии придонного слоя. Эти мелко-масштабные пульсации с размерами, близкими к толщине придонного слоя, возникают и диссипируют внутри самого придонного слоя (рис. 38). Таким образом, придонный слой представляет собой обо-

Рис. 38. Турбулентная структура руслового потока (по И.К. Никитину и экспериментальным данным автора)

*A* — основная толща (турбулентное ядро) потока; *B* — область придонного слоя; *B* — аллювий граничного слоя (в приисковой практике — "спай")



собленную область течения, в которой наблюдаются свои особые зависимости осредненных вертикальных и продольных пульсационных скоростей, резко отличные от зависимостей в остальной толще турбулентного потока. Структура течения в придонной области шероховатого русла оказывается весьма устойчивой и не зависящей от относительной шероховатости русла, т.е. от  $d_{cp}/H$ , где  $d_{cp}$  — средний диаметр обломков аллювия,  $H$  — глубина русла. Граница этого слоя с увеличением числа Рейнольдса потока и крупности аллювия приближается к вершинам выступов шероховатости, но не опускается ниже их вершин.

Эти особенности придонного слоя весьма важны для понимания механизмов концентрации в водном потоке: гидродинамическая среда в водотоках любого размера будет практически одинаковой, если

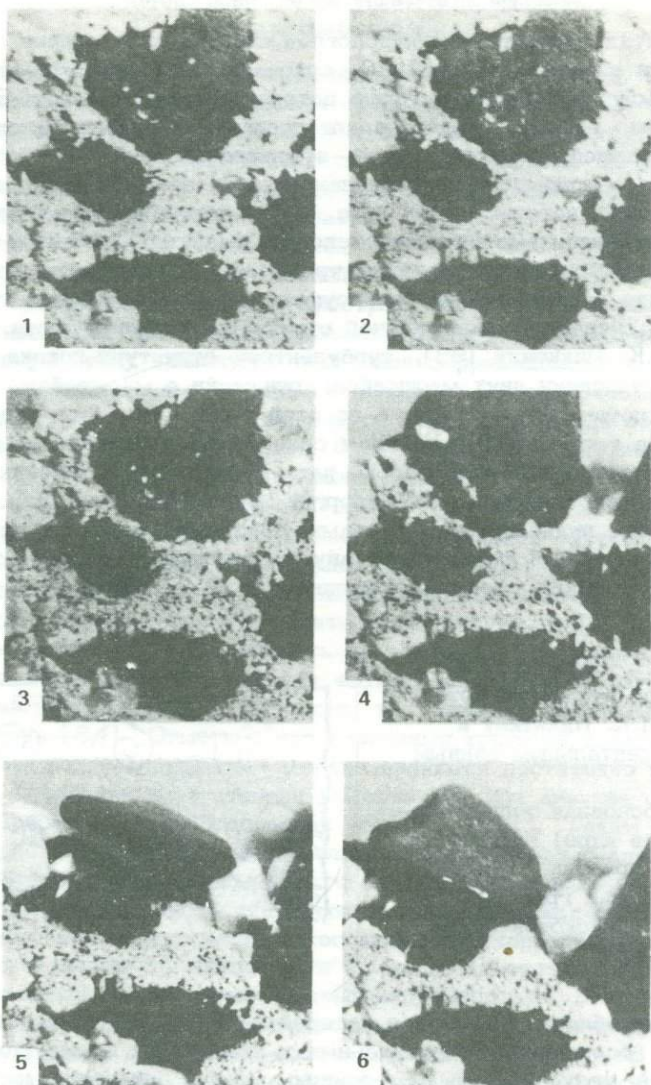


Рис. 39. Последовательные фотоснимки размываемого слоя

1 — через 1 с после начала размыва; 2-6 — то же, через 4, 5, 6, 8 и 12 с соответственно с момента размыва (увел. 1,3)

сохраняется достаточная шероховатость дна. Следовательно, россыпеобразующие свойства любых водотоков в отношении условий для концентрации ценных минералов и механизмов взаимодействия частиц в придонном слое принципиальных отличий не имеют. Напомним,

что к такому же заключению мы пришли в связи с отсутствием в водотоках различных классов существенных расхождений в скорости течения, вертикальной составляющей скорости и некоторых других параметрах.

Изложенные представления о турбулентной структуре водотоков с большой шероховатостью дна подтверждаются особенностями строения аллювия, в частности гранулометрическим спектром аллювиального осадка. В дополнение к этим данным нами сделана попытка воспроизвести на экспериментальном устройстве качественную картину расслоения потока и возникающих при этом явлений. Такие опыты целесообразны даже при неполном соблюдении подобия модели и натурной среды, если при этом воссоздаются явления, качественно тождественные природным и подчиненные тем же законам.

Опыты проводились на кольцевом гидрлотке, специально сконструированном для этих целей [217]. В результате экспериментов установлено, что представление о придонном слое совершенно объективно и может быть положено в основу механизма концентрации. Применявшаяся в опытах фоторегистрация и скоростная киносъемка процессов формирования осадка дали возможность отчетливо выявить природу механизма концентрации россыпеобразующих минералов в водно-аллювиальной среде. В частности, на последовательных фотографиях размываемого слоя отчетливо видно, как происходит вымывание мелких частиц из пространства между более крупными обломками (рис. 39).

#### Гидравлическая крупность минералов и обломочного материала

Значение гидравлической крупности минералов для их концентрации в аллювии показано на примере золота М.И. Львовичем [84]. Для целей обогащательной практики вопрос о гидравлической крупности подробно проанализирован Л.П. Мацуевым [92], а в приложении к проблемам россыпеобразования изучен нами [207, 212, 218]. В последние годы этот вопрос привлек внимание ряда зарубежных исследователей [233, 236, 237]. В отличие от определений гидравлической крупности на основе многочисленных расчетных формул нами применялись массовые прямые измерения гидравлической крупности золота, касситерита, платины и ряда других минералов продуктивного пласта россыпных месторождений. Первоначально установлено, что сам по себе удельный вес минералов (плотность) не является решающим условием их концентрации. Например, касситерит и золото при ощутимой разнице плотностей ведут себя в воде почти одинаково [212]. Этот факт свидетельствовал о том, что недостаточно характеризовать минералы только их плотностью и размерами зерен. Поэтому определения гидравлической крупности были поставлены в более широких масштабах [218]. Кроме того, были выполнены измерения гидравлической крупности различных фракций аллювия.

Наиболее важный фактор, от которого зависит гидравлическая крупность, — форма минеральных зерен. В опытах с изменяемой фор-

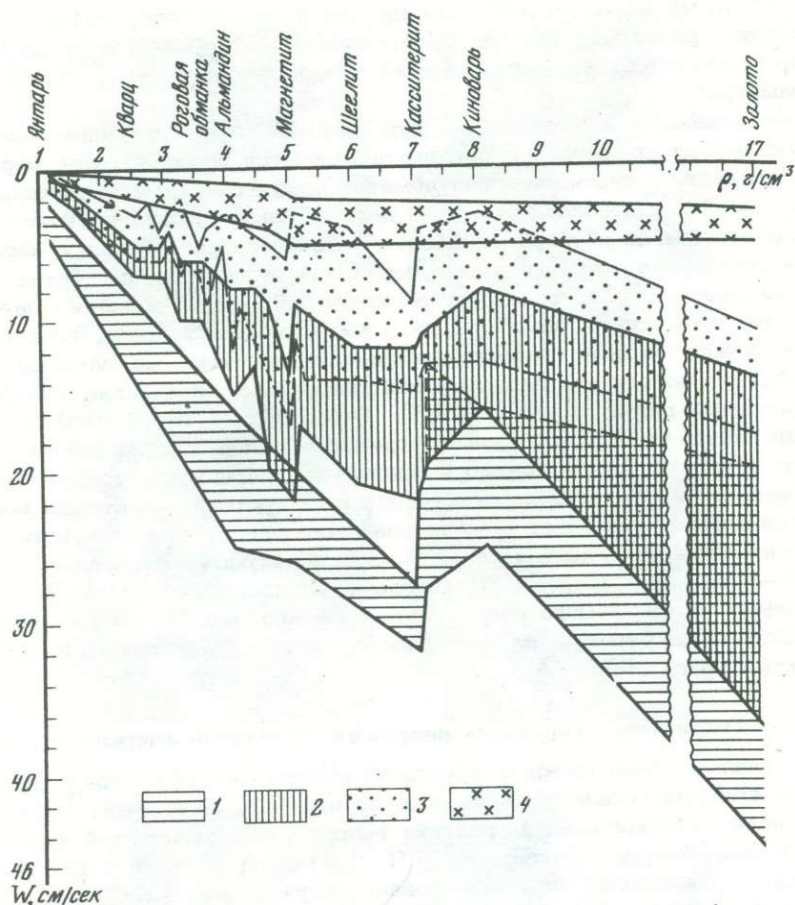


Рис. 40. Скорость осаждения (гидравлическая крупность) минералов ( $W$ ) различного удельного веса ( $\rho$ )  
 Фракции (в мм): 1 - 2-1; 2 - 1-0,5; 3 - 0,5-0,2; 4 - <0,2

мой частиц наблюдалось резкое уменьшение гидравлической крупности уже при небольшом отклонении формы частиц от сферической [207]. Это приводит к выравниванию гидравлических крупностей больших по размерам, но уплощенных частиц и мелких, но изометричных. В связи с этими данными стало понятно, почему в любой пробе золота из россыпи одновременно присутствуют и мелкие и крупные фракции золота: различие формы уравнивает их гидродинамическую активность. Таким образом, на примере золота выяснен генетический смысл формы частиц в качестве основного свойства, от которого зависит гидравлическая крупность минерального зерна и, следовательно, способность к концентрированию в водно-аллювиальной среде. При анализе реального распределения частиц золота в россыпных месторождениях было найдено следующее соотношение

Таблица 37

Характер связи гидравлической крупности, формы и размера зерен некоторых шлиховых минералов из россыпей Северо-Востока СССР

Минерал	Уд. вес*, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент сферичности <sup>2*</sup>	Гидравлическая крупность (см/с) минералов разных фракций, мм			
			2-1	1-0,5	0,3-0,2	0,2
Золото	16,9	51-91	20-45	4-37	11-18	3-5
Киноварь	8,2	61-79	16-25	8-16	3-12	-
Вольфрамит	7,1	59-81	13-29	11-20	4-12	-
Касситерит	7,0	79-85	29-32	12-22	9-13	-
Шеелит	6,0	67,85	-	12-21	4-12	-
Колумбит	6,0	67,79	-	9-13	4-11	-
Магнетит	5,2	75-91	-	9-17	3-13	2-5
Пирит	5,0	85-93	20-26	15-22	9-17	-
Ильменит	4,7	71-83	-	9-20	5-14	1-4
Пикотит	4,6	75-85	-	11-12	4-11	-
Малакон	4,3	63-73	-	-	3-5	-
Рутил	4,2	69-75	-	-	3-9	-
Альмандин	4,1	83-93	16-25	8-15	3-12	-
Брукит	4,1	67-79	-	-	3-7	-
Шпинель	3,9	75-79	-	-	5-6	-
Лимонит	3,7	75-81	-	-	5-7	-
Топаз	3,6	67-75	-	6-10	5-7	-
Сфен	3,4	63-77	-	-	3-4	-
Эпидот	3,4	69-81	-	-	3-5	-
Амфибол	3,3	49-71	-	6-10	2-7	-
Турмалин	3,1	73-81	-	4-8	3-5	-
Андалузит	3,1	63-77	-	-	2-3	-
Бiotит	3,1	73-83	-	5-7	4-6	-
Актинолит	3,0	45-69	-	5-7	2-6	-
Кварц (окатанные зерна)	2,6	57-93	10-21	5-7	3-6	-
Кварц (неокатанные зерна)	2,6	60-90	7-17	6-8	3-6	-
Янтарь <sup>3*</sup>	1,1	45-81	1-2	0,5-2	Менее 0,1	-

\* По А.А. Кухаренко [71], Н.А. Шило [201], и др.

2\* По Дж. Гриффитсу [37] с умножением на 100.

3\* На Северо-Востоке редок, данные получены для янтаря из россыпей Прибалтики. Прочерк означает отсутствие в опыте этих фракций.

частиц различной гидравлической крупности ( $W_0$ ):

$W_0 > 0,200$  м/с - 85-90%;

$W_0 = 0,150-0,200$  м/с - 7,5-10%;

$W_0 = 0,100-0,150$  м/с - 3-5%.

Анализ экспериментальных и геологических материалов показал, что в россыпях золота накапливаются такие зерна, которые имеют гидравлическую крупность 0,150-0,200 м/с и выше. Именно к этим значениям близки величины вертикальной составляющей скорости водного потока (см. табл. 36). Экспериментальные данные

Таблица 38

Гидравлическая крупность самородной платины \*

Вес частиц, мг	Размер частиц по осям, мм			$K_y^{2*}$	Гидравлическая крупность, см/с
	A	B	C		
13,2	1,9	1,6	0,8	1,2	38
29,5	2,5	1,3	1,0	0,9	38
31,0	2,0	1,8	0,9	1,1	40
65,1	2,6	2,5	1,9	0,3	42
75,6	4,2	2,7	2,0	0,7	48

\* Коллекция А.Г. Мочалова.

2\* По формуле Н.Б. Вассоевича  $K_y = (A+B)/2C - 1$ .

о гидравлической крупности других россыпеобразующих и шлиховых минералов (табл. 37) позволяют считать, что, кроме размера, формы и удельного веса минералов, на скорость их осаждения существенно влияет характер поверхности зерен. Например, в ряду от золота к алмазину при 4-кратном уменьшении удельного веса гидравлическая крупность уменьшается лишь на 20-60% для разных фракций. Если же сравнить киноварь и алмаздин, то эти минералы вообще не различаются по гидравлической крупности при различии удельных весов вдвое. Влияние микрорельефа поверхности хорошо заметно на примере кварца: окатанные и неокатанные зерна одинакового размера различаются по гидравлической крупности на 20-40%. Подобные же соотношения обнаруживаются для пар минералов киноварь-пикотит, монацит-кварц, золото-пирит, резко различающихся по удельному весу, но близких по значению гидравлической крупности. В связи с тем что значения гидравлической крупности разных минералов взаимно перекрываются (рис. 40), их "чистого" разделения в водно-аллювиальной среде не происходит.

Проведенное позднее исследование гидравлической крупности самородной платины из россыпных месторождений показало, что этот минерал по своей гидравлической крупности близок к золоту, несколько превышая скорости осаждения золота (для сравнимых размеров зерен) (табл. 38). Судя по высоким значениям гидравлической крупности, зерна платины обладают еще более жесткой фиксацией в точках своего нахождения в водно-аллювиальной среде. В целом из анализа вопроса о гидравлической крупности россыпеобразующих и шлиховых минералов можно сделать вывод, что в различных геологических построениях и моделях гидравлическая крупность минералов должна рассматриваться в качестве основного параметра, характеризующего поведение минералов в водной среде. В этом обобщающем показателе природой учтены многие свойства минеральных зерен: их размер, форма, удельный вес, особенности поверхности и т.д.

Таблица 39

Гидравлическая крупность обломков кварца псефитовой размерности ( $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$ )

Линейные размеры по осям (в см) и коэффициент уплощения обломков ( $K_y$ ), см				Вес, г	Гидравлическая крупность, см/с
A	B	C	$K_y$		
14,9	13,1	8,6	0,63	1506	102
16,1	12,1	6,9	1,04	1253	89
13,4	9,5	6,4	0,79	922	87
11,0	8,4	6,5	0,49	695	98
11,6	7,3	5,7	0,66	660	89
9,6	6,4	5,5	0,45	591	95
11,0	9,0	4,9	1,04	517	94
8,3	6,5	3,7	1,00	326	86
10,1	5,1	4,4	0,73	323	94
8,1	5,1	4,3	0,53	347	97
6,9	4,8	4,5	0,30	213	92
7,8	5,4	3,9	0,69	206	78
6,7	5,6	5,5	0,12	191	80
6,5	3,0	3,7	0,28	100	64
5,8	4,9	2,2	1,43	81	57
4,8	3,8	2,7	0,59	77	68
4,6	4,0	2,8	1,54	63	74
3,7	2,9	1,6	1,06	28	58
3,5	2,7	1,1	1,82	17	47
2,7	1,9	1,3	0,77	12	56

Интересен вопрос о гидравлической крупности обломков гравийной и галечной размерности. Нами произведены измерения гидравлической крупности обломков кварца в широком интервале размеров и веса (табл. 39). Эти данные свидетельствуют о том, что и для крупнообломочного материала влияние формы для поведения обломка в водно-аллювиальной среде весьма существенно.

Например, оказалось, что обломки разного веса и размера могут иметь одинаковые значения гидравлической крупности, если их коэффициенты уплощенности находятся в обратных соотношениях. Весьма интересным и требующим дальнейшего изучения оказался вопрос о причинах незначительных различий в гидравлической крупности при большой разнице веса обломков. В частности, обломки, различающиеся более чем в 100 раз по весу, имеют разницу по гидравлической крупности только в 1,8 раза (см. табл. 39).

Итак, выше рассмотрены основные составляющие водно-аллювиальной среды, взаимодействием которых обусловлены поведение и концентрация россыпеобразующих минералов. Взаимодействием

этих факторов обусловлено и формирование самого осадка, т.е. того минерального каркаса, в котором распределены ценные минералы. Поэтому, говоря о механизмах концентрации ценных минералов, не следует упускать из виду, что концентрация осуществляется одновременно с явлениями гидромеханического дробления, истирания, растворения и другими видами взаимодействий между компонентами водно-аллювиальной среды, включая и россыпеобразующие минералы. Коснемся этих явлений хотя бы в сжатом виде.

#### Процессы дробления и корразии рудного вещества в водно-аллювиальной среде

Дробление и корразия – два важнейших процесса, которые в геологии россыпей, да и во многих смежных разделах геологических и географических наук, не получили еще того освещения и интерпретации, которых они заслуживают. Значение этих процессов определяется тем, что наряду с транспортировкой материала реками дробление и корразия являются главным видом взаимодействий в водно-аллювиальной среде. В энергетическом отношении на дробление и корразию расходуется значительная часть кинетической энергии потока. К.К. Никитин отмечает, что за счет трения между слоями воды кинетическая энергия осредненного движения из всех слоев основного турбулентного ядра течения "перекачивается" [98, с. 84] к границе придонного слоя и внутрь его. Граница придонного слоя отвечает зоне перехода энергии осредненного движения в энергию пульсационного. Поэтому вся кинетическая энергия осредненного движения, переносимая в придонный слой за счет турбулентной диффузии, затрачивается внутри слоя в основном в виде работы на преодоление сил реакций выступов шероховатости и частично переходит в энергию пульсационного движения [98, с. 84]. По своей энергетической сущности дробление – это результат ударных взаимодействий, при которых продукты разрушения образуются в соответствии с теорией прочности хрупких материалов. Корразия же является следствием касательных взаимодействий, в результате которых образуется только мелкий материал. Очевидно, что дробление присуще водотокам с высокой кинетичностью, а в реках со спокойным течением преобладает корразия.

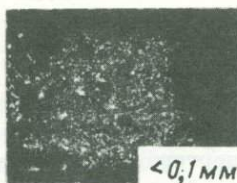
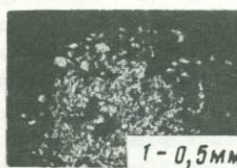
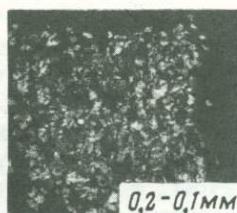
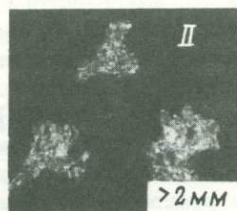
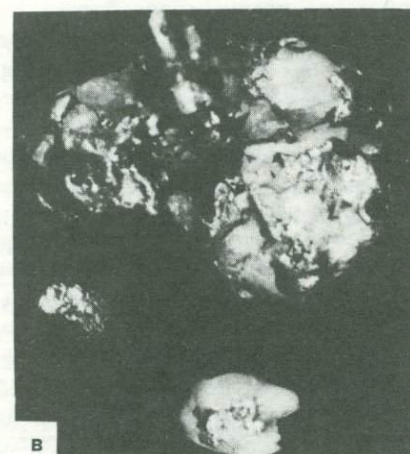
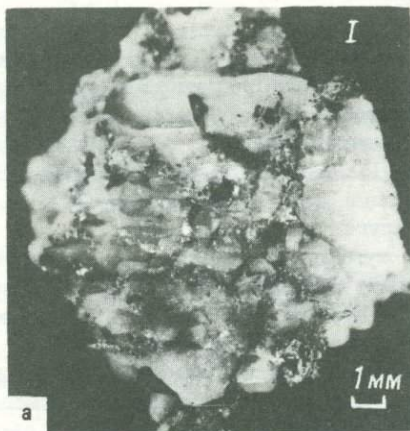
Смешение или нечеткое разграничение дробления и корразии привело исследователей к ошибочным истолкованиям процессов, происходящих в водно-аллювиальной среде. Например, Ю.А. Билибин считал, что при постепенном истирании гальки и заключенный в ней металл испытывает столь же медленное истирание, давая лишь мельчайшие частицы косового золота. При раскальвании гальки освобождение заключенного в ней металла, как правило, не происходит. "Мелкое же дробление, при котором только и освобождается металл, при переносе гальки не имеет места" [9, с. 111]. В. Линдгрэн, напротив, считал дробление совершенно обычным явлением, отмечая, что "при образовании россыпей природа со своей обычной медленностью проводит те же процессы дробления и концентрации,

которыми мы пользуемся при механическом обогащении руд. От быстрых перемен температуры породы разрушаются и измельчаются; то же самое происходит и под влиянием ударов, наносимых оползающими и уносимыми водой обломками пород, перетирающего действия льдов..." [76, с. 6]. Процессы дробления материала кварцевых жил в горных потоках Э. Данн [226] уподоблял действию трубчатых мельниц обогатительных фабрик. Большое значение процессов дробления рудного материала подчеркивал В.И. Смирнов [150], отмечали Н.А. Шило [196] и многие другие исследователи.

Очевидно, что в приведенных суждениях отражена, с одной стороны, недооценка явлений дробления обломочного материала в русле водотоков (Ю.А. Билибиным), а с другой — игнорирование процессов корразии минеральных частиц в аллювии (В. Линдгрэн и др.).

Наши эксперименты по изучению процессов транспортировки в водно-аллювиальной среде золота, платины, касситерита подтвердили, что в действительности необходимо учитывать явления и дробления и корразии, интенсивно выраженные при переносе материала в русле. В частности, для золота показано [204, 108], что в процессе дробления золото-кварцевых агрегатов происходит выкрашивание мелких сростков золота и кварца (рис. 41, I), отламывание выступающих отростков зерен и т.д. После того как закончится грубая обработка рудного агрегата, дробление сменяется корразией поверхности золотинок, их деформацией, что придает поверхности крупных частиц характерный самородковый вид. В целом рудный агрегат дает спектр частиц золота различной крупности (рис. 41, II). Платина обладает более высокой твердостью по сравнению с золотом и поэтому не меняет заметно формы частиц (рис. 42, I, II), в то время как касситерит при переносе на те же расстояния дает совершенные формы окатанности (рис. 42, III-V).

Следует подчеркнуть, что кварц, как наиболее абразивный компонент водно-аллювиальной среды, истирается крайне медленно. При этом тот факт, что обломки кварца даже хорошей окатанности (рис. 43, I и I<sup>1</sup>) испытали интенсивное ударное воздействие, легко обнаруживается по густой сети трещин, выявляемых пигментацией кварцевых галек (рис. 43, II и II<sup>1</sup>). В соответствии с теорией разрушения такие кварцевые обломки накапливают в себе системы трещин до некоторого критического уровня, после чего обломок распадается одноактно на спектр частиц различной крупности. Сравнительное изучение поведения в водно-аллювиальной среде минералов и рудного материала различных россыпнеобразующих формаций позволило выявить ряд особенностей. Установлено, что процесс дробления в большей степени свойствен крупнообломочному материалу, а корразия — обломкам сравнительно небольшой массы и размеров (первые граммы и сантиметры и менее). Процессы дробления исследованы нами на примере рудного кварца золото-кварцевой малосульфидной формации. Эксперимент состоял в изучении изменения гранулометрического спектра кварца в процессе его транспортировки. Для этого пробы весом 15-20 кг помещались в кольцевой гидроток и подвергались транспортировке водным по-



I

II

током с периодическим измерением гранулометрического состава. Полученные данные (табл. 40) свидетельствуют о сложных процессах, происходящих в гидродинамически-активной дисперсной среде.

В частности, из опыта I следует, что из первоначально взятых четырех размерных фракций в процессе транспортировки формируется весь спектр частиц, характерный для водно-аллювиальной среды. Особенно наглядно прослеживается поведение отдельных фракций при графическом изображении результатов (рис. 44). Выделяются три типа поведения обломочного материала. Наиболее крупные обломки интенсивно дробятся (200-100 и 100-75 мм), давая следующую за ними размерную генерацию (75-50 мм), доля которой возрастает. Часть материала (50-30 и 30-10 мм) ведет себя индифферентно на протяжении всего опыта (к этим фракциям близки по поведению фракции от 10 до 0,5 мм), а третья группа частиц устойчиво возрастает в количественном отношении. Аналогичная картина поведения выявлена и в других опытах (рис. 44, II и III).

Интересен также эксперимент, в котором в одних и тех же условиях осуществлялся перенос рудного материала золото-кварцевой формации и кимберлитов из коллекции ЦНИГРИ. Скорости дробления и корразии того и другого материала резко различны (табл. 41), причем наибольшая потеря веса наблюдается в начальные стадии транспортировки. Аналогичная закономерность выявляется в поведении некоторых россыпеобразующих минералов. В частности, самородное золото изменяет массу на первом этапе переноса наиболее быстро, а затем потери происходят меньшими темпами, но постоянно и равномерно нарастают. Это связано с тем, что золото пластично и его износ в водно-аллювиальной среде происходит главным образом за счет корразии (особенно после того, как на первой стадии переноса выкрошатся дендритовидные выступы, кварцевые включения и т.д.). Весьма близкие результаты получены и другими исследователями [239].

Минералы самородной платины (табл. 42) обнаруживают черты двойственности. Наиболее хрупкие зерна способны быстро терять свою массу за счет раскалывания. Пластичные минералы пластины равномерно теряют вес, а наиболее твердые зерна минералов могут быстро изменить массу на первой стадии за счет выкрашивания включений, а затем совершенно ее не изменять. Основной чертой поведения касситерита является способность резко (в 5-20 и более раз) уменьшаться в массе (для единичного зерна) в связи с раскалыванием зерен.

Таким образом, дробление и корразия - два важнейших процесса, происходящих в водно-обломочной системе при ее поступательном

---

Рис. 41. Изменение рудных агрегатов кварца и золота при переносе в водно-аллювиальной среде

I - сrostок золота с кварцем до опыта (а), после транспортировки на 3 (б) и 6,5 (в) км; II - частицы золота, образовавшиеся в процессе дробления и корразии исходного агрегата

Таблица 40

Характерное изменение гранулометрического состава хрупкого материала при транспортировке в водном потоке\*

Размерные фракции, мм	Гранулометрический состав на различных стадиях эксперимента, вес. %						
	до опыта	через 3,7 км	через 7,5 км	через 15 км	через 37,5 км	через 75 км	через 150 км
1	2	3	4	5	6	7	8

## Опыт I

200-100	18,4	-	-	-	-	-	-
100-75	50,8	57,7	53,9	52,1	47,7	32,0	17,4
75-50	14,9	21,9	22,8	23,0	25,7	39,4	50,7
50-30	15,9	16,7	15,4	16,6	15,8	16,7	17,5
30-10	-	1,8	4,8	5,0	6,6	5,3	4,1
10-5	-	0,5	0,6	0,4	0,3	0,1	0,1
5-2	-	0,5	0,5	0,3	0,1	0,05	0,01
2-1	-	0,3	0,5	0,2	0,09	0,03	0,01
1-0,5	-	0,22	0,5	0,38	0,17	0,04	0,01
0,5-0,25	-	0,17	0,5	0,8	0,8	0,6	1,81
0,25-0,1	-	0,07	0,21	0,62	1,2	1,62	2,53
-0,1	-	0,09	0,13	0,6	1,5	4,17	5,84
Сумма	100,0	99,95	99,84	100,0	99,96	100,01	100,01
$S_0$	1,20	1,28	1,31	1,33	1,34	1,36	1,33
$Md$	87,10	79,43	71,28	79,43	72,44	64,57	58,88

## Опыт II

200-100	12,7	12,7	12,7	12,8	12,8	12,8	-
100-75	49,5	48,8	48,1	47,5	42,7	41,7	24,9
75-50	13,6	11,0	10,7	8,2	11,6	11,2	33,5
50-30	13,7	11,8	9,7	9,4	7,8	5,6	7,8
30-10	7,9	10,6	11,5	11,2	10,1	9,3	6,7
10-5	1,2	1,8	2,0	1,5	0,7	0,2	0,05
5-2	0,6	1,5	1,5	0,9	0,3	0,07	0,01
2-1	0,3	0,6	1,3	0,6	0,1	0,06	0,01
1-0,5	0,21	0,4	0,9	1,4	0,3	0,08	0,03
0,5-0,25	0,19	0,42	1,0	3,4	5,3	5,0	6,2
0,25-0,1	0,05	0,17	0,4	1,7	4,1	5,8	8,6
-0,1	0,05	0,21	0,2	1,4	4,2	8,19	12,2
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
$S_0$	1,28	1,44	1,44	1,60	1,76	2,21	14,42
$Md$	83,18	85,11	81,28	81,28	79,43	79,43	50,12

## Опыт III\*

30-10	72,6	-	-	53,5	52,9	50,2	47,0
10-5	8,2	-	-	17,7	17,7	18,6	17,6

Таблица 40 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8
5-2	7,9	-	-	7,2	7,2	10,1	7,3
2-1	4,6	-	-	5,6	5,3	2,8	5,0
1-0,5	3,6	-	-	4,1	3,9	4,0	3,4
0,5-0,25	2,0	-	-	4,3	4,2	4,6	4,4
0,25-0,1	0,9	-	-	4,1	3,2	2,8	7,1
-0,1	0,8	-	-	3,5	5,5	6,9	8,2
Сумма	100,0	-	-	100,0	100,0	100,0	100,0
$S_0$	1,41	-	-	1,99	2,29	2,04	3,16
$Md$	13,80	-	-	10,47	10,00	10,00	9,55

\* Размерность материала в опытах: I - от крупного щебня до мелких глыб; II - от алеврита до мелких глыб; III - от щебня до алеврита.  
 2\* В опыте III замеры после 3,7 и 7,5 км не производились.

движении в направлении течения потока. Эти процессы развиваются на различных энергетических уровнях. Н.В. Разумихиным [125] показано, например, что в экспериментальных барабанах при медленном вращении преобладает трение обломков друг о друга, а при более быстром вращении барабана, что, естественно, требует при-

Таблица 41

Изменение веса обломков кварца и кимберлита в зависимости от пройденного расстояния

Тип рудного материала	Начальный вес, г	Пройденные расстояния (км) и потеря массы обломков, %			
		1	2	3	4
Кварц	550,8	0,31	0,45	0,51	0,53
	600,3	0,42	0,44	0,52	0,52
	320,1	0,29	0,33	0,41	0,43
	635,0	0,97	1,03	1,08	1,12
	711,7	1,01	1,10	1,20	1,22
	638,1	0,38	0,47	0,53	0,55
	503,7	0,41	0,49	0,56	0,58
Кимберлит	508,4	3,02	6,51	7,54	9,08
	565,2	1,25	3,02	6,52	8,50
	423,0	1,39	3,92	5,25	6,19
	474,15	5,41	14,30	23,90	30,30
	505,0	1,19	1,85	6,29	9,36
	344,4	2,00	5,39	7,61	8,72
	315,19	0,95	1,65	3,08	3,95
	158,2	2,27	7,45	10,2	12,1

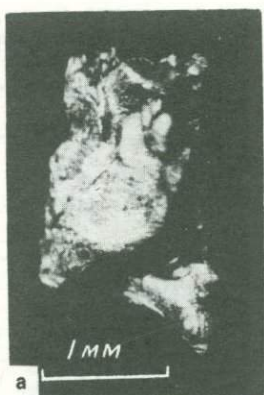


Рис. 42. Изменение формы зерен минералов самородной платины (I, II) и касситерита (III-V) в процессе переноса их в водно-аллювиальной среде



III

IV

V

*a* — вид перед опытом; *б, в* — после переноса на расстояние 6,5 и 13 км соответственно.

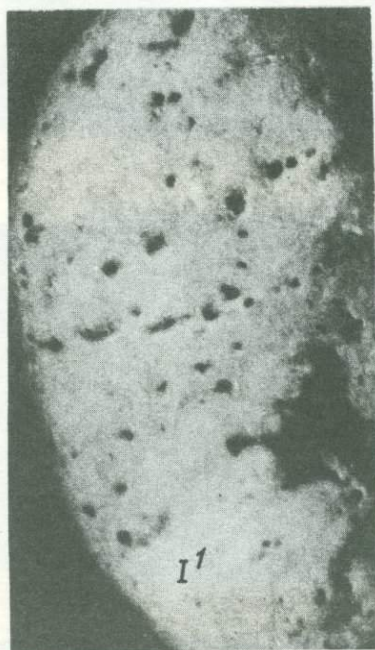


Таблица 42

Изменение массы минеральных зерен при переносе в водно-аллювиальной среде в зависимости от расстояния

Минерал	Начальный вес, мг	Расстояние переноса (км) и потеря массы, %			
		1	2	3	4
Самородное золото	47,97	0,10	0,15	0,23	0,25
	55,58	0,23	0,45	0,68	0,76
	9,89	0,8	0,8	0,9	1,1
Платиноиды	65,10	0,15	0,46	0,61	0,77
	13,20	-	0,8	0,8	0,8
	75,60	1,59	1,85	1,85	1,85
	31,0	-	0,32	0,32	0,32
	29,50	-	0,34	0,34	0,34
Касситерит	1014,1	0,04	0,07	1,09	1,42
	618,6	0,02	0,05	0,82	1,10
	602,4	0,02	0,03	0,71	1,03
	398,3	0,02	0,03	0,23	0,40
	355,0	0,02	0,03	0,14	0,28
	300,7	0,03	0,07	0,17	0,37

ложения дополнительной энергии, происходит ударное взаимодействие обломков. Несмотря на довольно многочисленные к настоящему времени экспериментальные данные и натурные наблюдения, оценка процессов дробления и корразии носит скорее качественный характер. Главная причина некорректности имеющихся пока данных состоит в отсутствии достоверных критериев для учета влияния процессов физического выветривания аллювиального материала, которое накладывается на гидромеханическое дробление и истирание, а также роли абразии на месте в понимании С. Шамма и М. Стивенса [235].

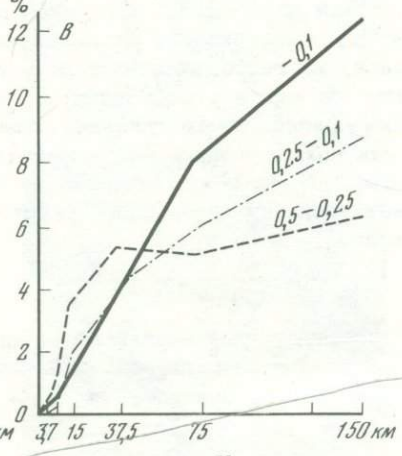
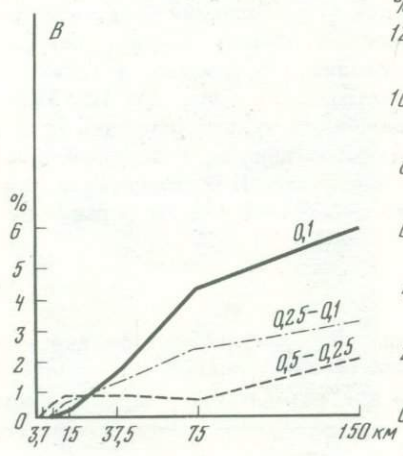
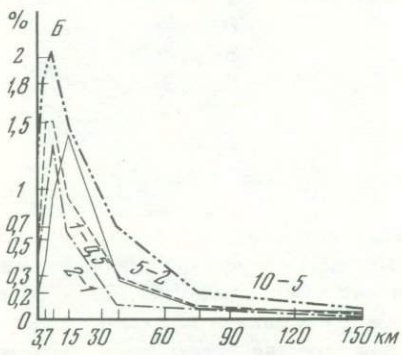
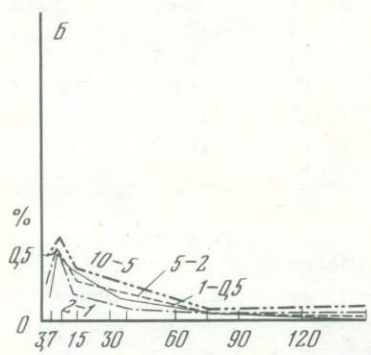
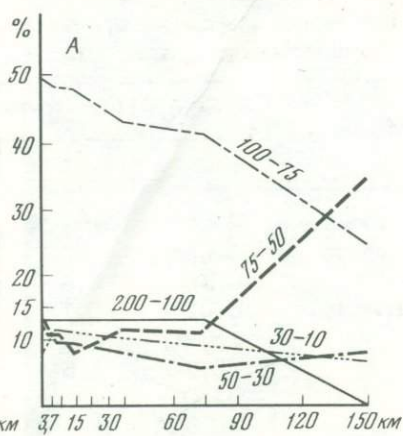
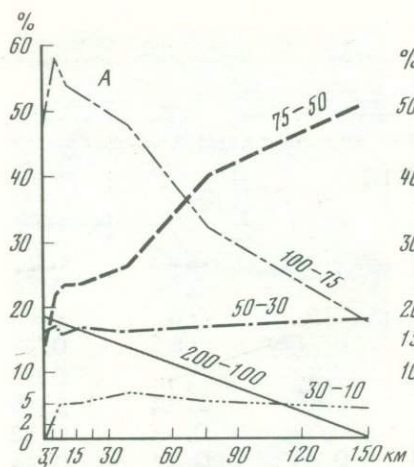
Для приближенных суждений о дальности транспортировки пригодны, как показали наши экспериментальные данные, некоторые эмпирически найденные соотношения. В частности, Н.В. Разумихин связывает величину пройденного расстояния с изменением формы обломков:

$$K = 1 - \frac{a}{(S + 1)^m}, \quad (10)$$

где  $a$  - некоторый численный параметр, определяемый физическими свойствами породы;  $m$  - показатель степени, равный примерно 0,15;  $S$  - расстояние переноса, км;  $K$  - коэффициент окатанности обломка.

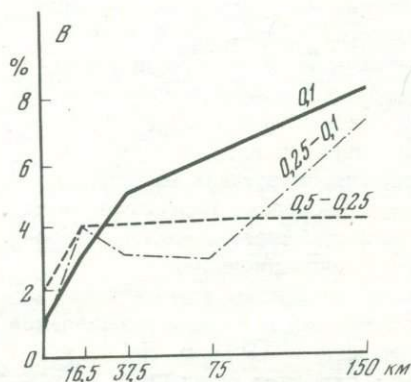
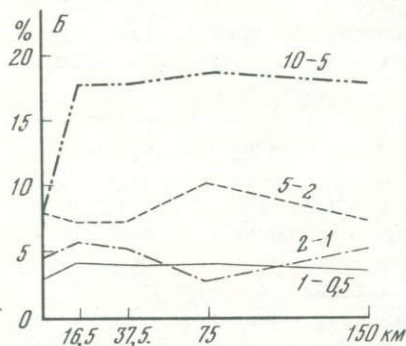
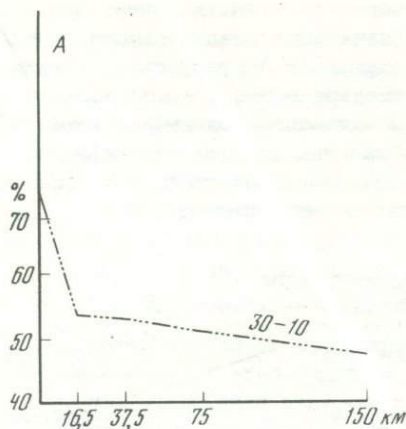
Рис. 43. Трешиноватость кварцевых галек, выявляемая методом пигментации (шкала в см)

$I$  и  $I^1$  - фронтальная и тыльная стороны гальки до прокрашивания;  $II$  и  $II^1$  - то же, после пигментации трещин



I

II



III

Рис. 44. Динамика изменения гранулометрического состава кварцевых обломков при их транспортировке на различное расстояние

Исходная проба представлена фракцией: I - 200-30 мм, II - от 200 до 0,1 мм; III - 30-0,1 мм; A, B, B - графики поведения отдельных групп фракций

А.В. Поляницын [120] оценивает пройденное расстояние по изменению веса обломка:

$$P \approx P_0 \cdot e^{-\frac{0,152x}{\sqrt{H}}}, \quad (11)$$

где  $P$  - вес частицы в процессе истирания;  $P_0$  - начальный вес обломка;  $x$  - длина пути переноса, км;  $H$  - твердость породы (кг/мм<sup>2</sup>), рассчитанная как среднее взвешенное по объему из величин микротвердости минералов, составляющих породу.

Следует отметить, что указанные отношения пригодны для решения некоторых задач гидрологии и оценки потоков рассеяния рудного вещества. На основе найденных закономерностей и более широких экспериментальных исследований могут быть разработаны методы индикации коренного источника по его ореолу или, наоборот, методы определения пространственного положения россыпной залежи по известному источнику.

Вместе с тем следует отметить, что для понимания во всех деталях

процессов формирования россыпных концентраций главное значение имеет не исследование веса или формы единичных обломков, а изменение гранулометрического спектра рудного вещества и россыпеобразующих минералов при транспортировке их в водном потоке.

Именно в этом случае появится возможность создать единую картину поведения рудного вещества от начальных стадий выветривания и формирования элементарного (или первичного) гранулометрического состава до трансформации этого спектра в русле и его последующей эволюции на путях транзита к конечным водоемам стока. Тем не менее полученные экспериментальные данные уже сейчас позволяют более точно представить механизмы концентрации россыпеобразующих минералов в водно-аллювиальной среде.

#### МЕХАНИЗМЫ ПОВЕДЕНИЯ МИНЕРАЛОВ И УСЛОВИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ В ВОДНО-АЛЛЮВИАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Множественность геологических вариантов дальности переноса россыпеобразующих минералов, если не подвергать сомнению достоверность научных сообщений на эту тему (для чего, разумеется, нет никаких оснований), свидетельствует о явной некорректности теоретических представлений о механизмах поведения и концентрации минералов в дисперсных водно-обломочных средах. Поэтому замечание В.И. Смирнова, что по поводу условий накопления ценных минералов в аллювиальных осадках существуют лишь гипотезы [151, с. 465], является объективной констатацией конвергентности геологических явлений, ведущих к концентрации или рассеянию минералов. Действительно, анализ вопроса о концентрации минералов заставляет признать, что единственной альтернативой разноречивости имеющихся данных должно быть существование в природе множественности механизмов перемещения и концентрации россыпеобразующих минералов. В основе этих механизмов лежит простой физический фактор — гравитационные различия минералов. Однако, как было показано выше, действие этого фактора может быть проявлено на уровне энергетических взаимодействий интересующих нас минералов и соизмеримых с ними по размерам частиц. Если в силу своей гидравлической крупности минералы не в состоянии реализовать свое гравитационное преимущество в данной конкретной седиментационной системе, то они неизбежно будут подчинены поведению всей системы, т.е. испытывать перенос вместе с массой осадка. Механизмы концентрации россыпеобразующих минералов в водно-аллювиальной среде могут иметь несколько вариантов, выделяемых нами под названиями гравитационно-диффузионного, сегрегационного, миграционно-остаточного и миграционного.

Гравитационно-диффузионный механизм концентрации минералов без их горизонтального перемещения в водно-аллювиальной среде был предсказан М.И. Львовичем еще в 1934 г. На сугубо геологическом материале, касающемся строения россыпных месторождений, а также с привлечением расчетных данных и наблюдений за работой обогатительных устройств Н.А. Шило обосновал возможность накопления золота в горно-долинном аллювии Северо-Востока СССР без смещения вниз по течению [196]. Позднее к идее малой подвижности золота в речном потоке с разных направлений подходили многие исследователи, однако, кроме констатации, что такие

факты действительно имеют место, в большинстве опубликованных работ по геологии россыпей эти факты не получили глубокой теоретической интерпретации. Поэтому в 1969-1971 гг. нами была поставлена серия экспериментов в целях исследования механизмов концентрации золота в водно-аллювиальной среде. Позднее опыты были продолжены с использованием касситерита, имитаторов платины и алмазов. Опыты проводились с применением лотка циркулярного типа, обеспечивающего создание турбулентной структуры водного потока во всем диапазоне скоростей течения естественных потоков.

Детальный анализ материалов фото- и кинорегистрации экспериментальных процессов [213, 215] привел к выводу, что физическая природа явления концентрации более всего напоминает механизм диффузионного замещения твердых частиц, известный из физической химии. В данном случае речь не идет, разумеется, о химической концентрации элементов — причиной диффузии является неодинаковая плотность минералов, т.е. гравитационные различия компонентов аллювиального осадка. Явление гравитационной диффузии состоит в том, что частицы концентрирующегося минерала (черные точки на рис. 45), первоначально располагаясь на поверхности аллювиального осадка, постепенно оказываются в толще этого осадка. Механизм этого явления достаточно прост, легко воспроизводится в экспериментах и доступен непосредственному наблюдению при постановке опытов в лотках со стеклянными стенками. Сущность гравитационно-диффузионных явлений сводится к следующему.

Попадая на дно, россыпеобразующий минерал обособляется в промежутках между более крупными обломками. Действующие в придонном слое вертикальные пульсации будут взвешивать в первую очередь самые мелкие частицы, гидравлическая скорость которых меньше значений вертикальной составляющей. В каждый данный момент частицы россыпеобразующего минерала вследствие своего "гравитационного превосходства" будут запаздывать в реагировании на импульс вертикальной составляющей, поэтому они смогут сместиться несколько ниже и занять положение более легких частиц, извлеченных со своего места. Таким образом, естественная структура водного потока с характерным пульсационным режимом в придонном слое создает условия для постоянной миграции частиц повышенной гидравлической крупности в толщу аллювиального осадка. При скорости потока 1,5 м/с и небольшой его глубине, что весьма характерно для типичных россыпеобразующих водотоков, частота пульсаций на дне водотока может достигать, по данным Л.П. Мацуева, 18 импульсов в секунду, или 1100 колебаний в минуту, поэтому становится очевидным, какое интенсивное воздействие оказывает движущийся поток на материал своего дна, заставляя мелкие, но более тяжелые частицы погружаться все глубже в массу покоящегося аллювиального субстрата. Нарастание скорости и кинетичности (бурности) течения не только не препятствует развитию этого механизма, но, напротив, является благоприятным условием для его проявления. По мере увеличения скорости течения, скажем, в паводок, в движение начнут приходить все более глубоко лежащие час-

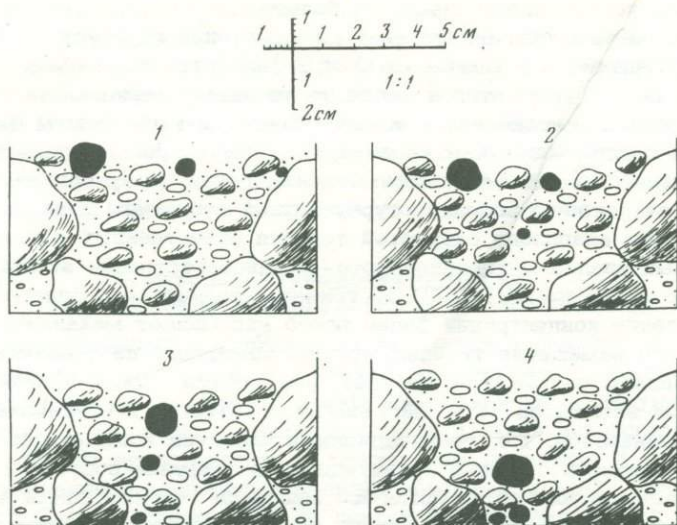


Рис. 45. Принципиальная схема поведения россыпеобразующих минералов при участии в гравитационно-диффузионном механизме концентрации (по экспериментальным наблюдениям)

1-4- состояние аллювиального осадка и положение накапливающихся минералов (черное) в последовательные моменты времени

тицы аллювия, а зерна россыпеобразующих минералов, постепенно смешаясь вниз, будут занимать место частиц аллювия, "выссылаемых" движущейся водной массой потока. Поэтому частицы любых россыпеобразующих минералов всегда оказываются приуроченными к неподвижной, наиболее крупнообломочной и хуже сортированной части аллювиального осадка. Характеризуемое явление отчетливо наблюдалось при разных условиях эксперимента (рис. 46).

Таким образом, гравитационно-диффузионный механизм концентрации минералов в водно-аллювиальной среде представляет собой обусловленную силой тяжести миграцию (диффундирование) минералов в толщу аллювия на некоторую глубину от поверхности дна с постепенным накоплением в виде продуктивного обогащенного прослоя. Миграция минерала на глубину осуществляется в результате обменных процессов между движущейся и неподвижной частями аллювиального осадка, между частицами аллювия и частицами минералов повышенной гидравлической крупности под влиянием пульсаций вертикальной составляющей скорости водного потока, вибрации обломков аллювия, криогенных процессов и т.д. Этот процесс протекает сингенетично с обменными процессами в любой водно-аллювиальной среде, и донные (т.е. прилежащие непосредственно к коренному дну долины) слои аллювия всегда содержат повышенное количество минералов тяжелой фракции. К близким выводам пришел

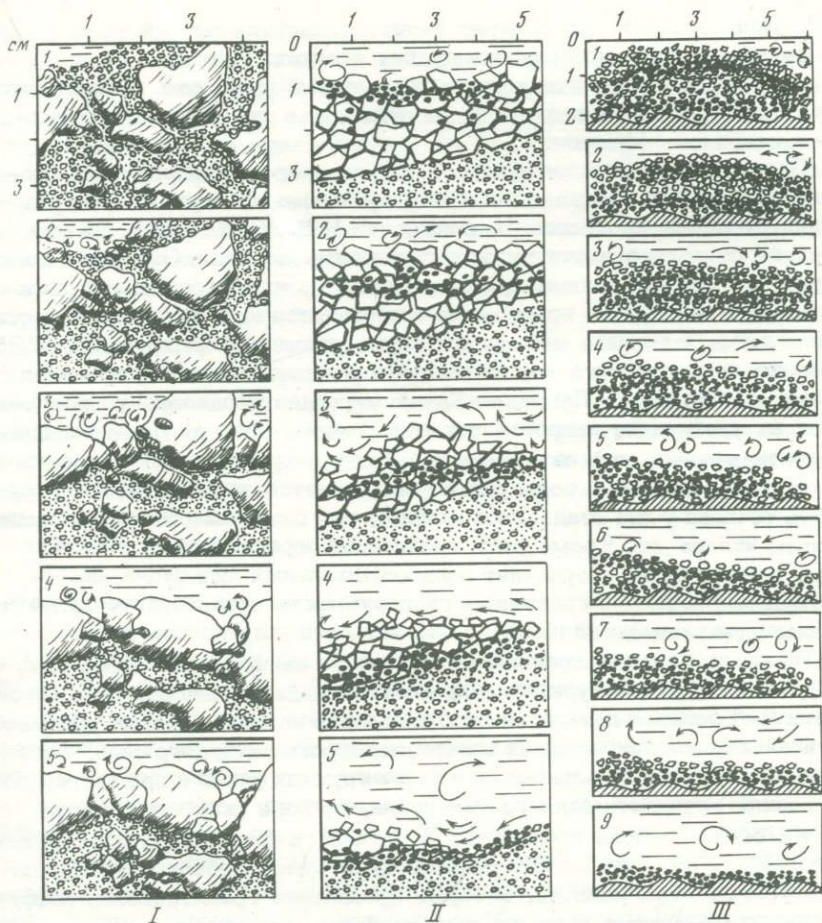


Рис. 46. Типичные варианты и разные стадии размыва осадка и концентрация минералов за счет гравитационной диффузии (ретушированные кадры фото- и киносъемки)

Общая картина размыва осадка (I): 1 - до начала размыва; 2-5 - в процессе размыва наблюдается постепенное вымывание мелких частиц из межзернового пространства среди более крупных. Проседание минералов через более крупные зерна (II): 1-5 - снимки размываемого слоя через интервалы времени в несколько секунд; проседание и слияние микрослоев (III): 1-2 - снимки первоначально разобренных слоев тяжелых минералов (черное), 3-9 - постепенное сближение и слияние микрослоев в единый прослой (на всех снимках движение воды справа налево)

С.В. Колесов [63], рассмотрев с теоретических позиций условия накопления золота в прибрежно-морских осадках.

Характеризуя гравитационно-диффузионный механизм концентрации в аллювии, необходимо указать на условия, в которых он проявляется наиболее эффективно.

Продуктивные горизонты аллювия чаще всего принадлежат к плотиковой фации и отражают инстративную динамическую фазу в развитии русловых процессов (в понимании И.П. Карташова). Низкая степень сортированности нижних горизонтов аллювия (на контакте с коренным дном долины) указывает на то, что флювиальный перемыв этого материала проявлялся слабо. Литологические особенности этого слоя, имеющего весьма сложную динамику формирования [205], позволяют считать его перлювием в том значении, какое придавал этому термину В.В. Ламакин. Такой материал неоднородно реагирует на увеличение скорости течения речного потока. Первыми приходят в движение мелкие и средние фракции, шероховатость дна и сопротивление движению воды резко увеличивается, вследствие чего скорость течения у дна становится меньше, чем следовало бы ожидать при данном уклоне дна. Кроме того, происходит перераспределение структуры потока: резко возрастает роль вертикальных пульсаций, значительная часть энергии потока не расходуется на транспортировку материала, а затрачивается на преодоление трения в придонном слое.

Используемые в гидрологии и гидравлике зависимости [183, 187, 98], а также наши натурные наблюдения приводят к выводу, что водотоки долин 3-4 порядка даже в моменты паводков не обеспечивают сплошного влечения донного аллювия в виде некоторого активного слоя. Этот процесс становится возможным в более крупных реках и при другом соотношении крупности донного материала, глубин и скоростей течения.

На основе теории обогащения [84, 92] и экспериментальных данных [51, 178, 98] можно указать некоторые наиболее существенные условия, при наличии, которых проявление гравитационно-диффузионного механизма концентрации наиболее вероятно.

Из рассмотренных выше особенностей поведения минералов в водно-аллювиальной среде следует, что необходимо оценить прежде всего оптимальное соотношение крупности частиц аллювия и россыпеобразующих минералов или рудных сростков, агрегатов и т.п. Если размер рудных частиц или минералов равен преобладающей размерности обломков аллювия или больше их, то погружение рудных обломков в слой аллювия будет затруднено. Они будут легко подвергаться смывающему действию потока и переноситься вниз по течению. Те частицы, размеры которых в 4 раза меньше слагающих дно обломков, будут скрыты от смывающего воздействия горизонтальной составляющей скорости потока. Следовательно, наиболее простое условие концентрации минералов в аллювии можно записать в виде соотношения

$$\frac{d_{ал}}{d_{зол}} \geq 4, \quad (12)$$

где  $d_{ал}$  - диаметр преобладающей части обломков аллювия;  $d_{зол}$  - диаметр частиц самородного золота или другого минерала.

Смысл соотношения (12) в том, что крупный аллювий определяет емкость поверхности дна в отношении гранулометрической дифференциации: чем крупнее обломки аллювия, тем более крупные рудные обломки или зерна минералов могут размещаться в углублениях. Это соотношение означает также, что для концентрации минералов важно, чтобы в русле сохранялись обломки, остающиеся неподвижными. Они активно влияют на гидравлические свойства самого потока (повышают шероховатость дна, увеличивают сопротивление движению воды, снижают скорость течения, усиливают турбулентность и т.д.). В силу резко выраженной неоднородности аллювия в руслах горного типа крупные обломки могут частично выступать над поверхностью воды, что приводит к образованию в бурном потоке застойных зон. Таким образом, второе условие концентрации минералов можно выразить в виде неравенства между максимальным размером аллювиальных обломков, которые не приводятся в движение водным потоком ( $d_{\text{макс}}$ ), и размером основной массы аллювиального материала, приходящего в движение ( $d_{\text{влек}}$ ) во влекомом или сальтирующем состоянии:

$$d_{\text{макс}} > d_{\text{влек}} \quad (13)$$

Следует заметить, что коллекторские свойства наиболее грубообломочных осадков для локализации россыпеобразующих минералов и накопления тяжелой фракции отмечались многими исследователями [84, 195, 51 и др.]. А.И. Имшенецкий писал, что грубообломочный материал предохраняет мелкие тяжелые частицы от смыва, а также способствует образованию сильных донных, завихрений воды, в которых осуществляется естественная сортировка переносимых наносов по удельному весу и крупности. Близкие выводы получены Б.С. Луныевым [83] и его сотрудниками [4, 107] при анализе дифференциации современного аллювия горно-равнинных рек. Таким образом, смысл условий (12) и (13) концентрации минералов в том, что при соблюдении условия (12) минералы не будут иметь непосредственного воздействия в горизонтальной плоскости; при соблюдении условия (13) минеральная частица не только фиксируется в данной точке дна, но и приобретает возможность обособления от остальной массы осадка в результате ее постепенного перемещения в самую нижнюю часть этого осадка. Однако эта вторая возможность обособления может быть реализована только в том случае, если частица минерала не извлекается из неровностей дна пульсациями вертикальной составляющей скорости течения. Следовательно, значение гидравлической крупности минеральной частицы ( $W_0$ ) должно превышать значение вертикальной составляющей ( $U_0$ ), т.е.

$$W_0 > U_0 \quad (14)$$

В теории водно-гравитационного обогащения вместо условий (12) и (14) вводится понятие о коэффициенте равнопадаемости, который связывает гидравлические крупности разделяемых в водно-аллювиальной среде частиц и их размеры. Чем больше коэффициент равнопадаемости, тем более благоприятны условия для разделения ми-

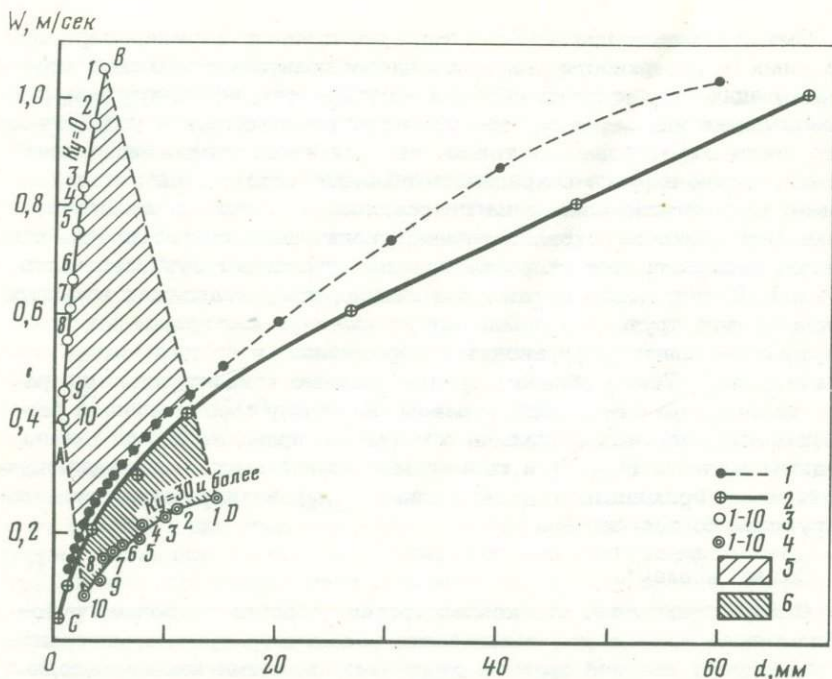


Рис. 47. Генетический график разделения минералов в водно-аллювиальной среде (на примере самородного золота)

1-2- кривая связи гидравлической и геометрической крупности обломков аллювия (по А.И. Животовской - 1) и кварца (по М.И. Львовичу - 2); 3-4 - десять экспериментальных частиц золота соответственно до опыта и после их уплощения; 5-6 - область благоприятных (5) и неблагоприятных (6) условий разделения частиц золота и аллювиального осадка; линии АВ и CD ограничивают значения минимальной и максимальной уплощенности частиц

нералов. Однако для излагаемых нами скорее качественных, чем количественных, условий концентрации минералов в естественном потоке, приведенные соотношения задают граничные условия, при которых концентрация минералов должна происходить в соответствии с гравитационно-диффузионным механизмом концентрации.

В дополнение к изложенным условиям концентрации россыпеобразующих минералов приведем генетический график концентрации, построенный нами для самородного золота (рис. 47). Из этого графика следует, что сферические или близкие к этой форме частицы золота (линия АВ) имеют наилучшие условия для концентрации, поскольку их гидравлическая крупность резко превышает гидравлическую крупность равновеликих частиц аллювия. По мере изменения формы частиц (увеличения их уплощенности) уменьшается их гидравлическая крупность, поэтому накопление весьма уплощенных частиц (линия CD) будет резко пониженным.

Более общие условия концентрации практически для всего спектра россыпеобразующих минералов могут быть выведены из приведенных выше соотношений. При этом все входящие в них величины могут быть определены экспериментально или непосредственными наблюдениями в полевых условиях (скорости течения, крупность аллювия). Возможное значение вертикальной составляющей скорости в естественных потоках определить сложнее. В.П. Батурин [5] считал, что вертикальная составляющая равна 0,08–0,05 продольной скорости потока, В.И. Смирнов [151] – 0,07–0,1. В теории обогащения значения вертикальной составляющей принимаются равными примерно 0,06 скорости течения или рассчитываются по формуле

$$U_0 = \frac{0,078 V_{\text{ср}}}{H 0,22}, \quad (15)$$

где  $V_{\text{ср}}$  – средняя по вертикали скорость течения;  $H$  – глубина потока.

Гравитационно-диффузионный вариант накопления минералов в водно-аллювиальной среде является хотя и достаточно типичным, но все же частным случаем концентрации и может проявляться в различных сочетаниях с другими механизмами накопления.

Сегрегационный механизм концентрации нами изучен на примере россыпных месторождений золота. Этот способ проявляется, когда питание формирующейся россыпи осуществляется за счет коренного дна долины и имеющихся здесь рудопроявлений. При этом формируются элювиально-аллювиальные россыпи [211, 148]. В этом случае, как отмечал еще Ю.А. Билибин, пополнение промышленного пласта происходит не сверху вниз, а как бы снизу вверх. Высвобождение россыпеобразующих минералов сопровождается их одновременной сегрегацией от вмещающего матричного вещества за счет его удаления водным потоком. На примере золота нами установлено [213], что, однажды попав в естественный трафарет плотика, частицы самородного золота лишаются возможности участвовать во флювиальном процессе и могут лишь постепенно опускаться на более низкие гипсометрические уровни по мере эрозии дна долины. Очевидно, что сегрегационный механизм концентрации осуществляется эффективнее, если матричная порода, заключающая россыпеобразующие минералы, легко разрушается выветриванием под действием гидромеханических факторов потока. Если размывается малосульфидная кварцевая жила, то ее обломки могут вовлекаться в перенос и накопление высвобождающихся из нее минералов будет происходить в обычном порядке. В целом же для проявления сегрегационного механизма достаточно нахождения рудного источника в дна долины и соблюдения названных выше критериев концентрации. Характерно, что на эту особенность поведения минералов давно обращали внимание горные инженеры, наблюдая безуспешность попыток извлечь золото из трещины плотика даже с помощью сильной струи воды.

Миграционно-остаточным нами назван способ концентрации минералов, описанный Ю.А. Билибиным [9]. Сущность этого механизма концентрации состоит в постепенном накоплении тяжелых

минералов в нижней части активного слоя аллювия, приводимого в движение рекой в моменты паводков. Перемещение таким способом, например золота, хотя бы и несколько замедленное по отношению ко всей массе выносимого из речной долины аллювия, постепенно приведет к уничтожению россыпи [196], если учесть к тому же высокую истираемость самородного золота [204].

Возникновение миграционно-остаточного механизма концентрации определяется в значительной степени литологическими особенностями водно-аллювиальной системы. Наиболее благоприятными условиями для формирования активного слоя аллювия являются его хорошая сортированность и пониженная крупность обломков, т.е. аллювий IV типа (см. рис. 34), приходящий в движение в виде слоя некоторой мощности, образуя донные гряды, предплёсовые перекаты, осередки и другие морфологически неустойчивые элементы речного русла. При массовом грядово-волновом или дюнно-грядовом движении аллювия дифференциация минеральных частиц по их гидравлической крупности оказывается затрудненной и они участвуют в переносе вместе со всей массой движущегося аллювия. Проседание тяжелых минералов в нижние слои движущегося аллювия в конце концов достигается, и эти минералы оказываются в итоге на контакте подвижного и неподвижного слоев аллювия. Но к этому моменту минералы уже пройдут некоторое расстояние по горизонтали. Таким образом, сущностью миграционно-остаточного механизма концентрации является определенное равновесие факторов, вызывающих миграцию минералов, и факторов, способствующих их выпадению из процессов транспортировки. Следовательно, формальное условие для проявления миграционно-остаточного механизма концентрации можно записать в виде соотношения

$$d_{\text{макс}} = d_{\text{влек}} \quad (16)$$

Это соотношение означает, что единственным отличием гравитационно-диффузионного и остаточно-миграционного механизмов концентрации является отсутствие в аллювии обломков с размерами, превышающими транспортирующую способность потока. Вполне понятно из этого, что, как только в русле создаются условия для сохранения части аллювия в неподвижном состоянии, концентрация минералов происходит по принципу гравитационной диффузии без их горизонтального перемещения.

Миграционный механизм концентрации наиболее характерен для минералов с удельным весом меньше  $4-5 \text{ г/см}^3$  (горный хрусталь, пьезокварц, поделочные и полудрагоценные камни, алмазы и др.). Формальными условиями проявления миграционного механизма концентрации являются

$$\frac{d_{\text{ал}}}{d_{\text{мин}}} \leq 4, \quad (17)$$

$$d_{\text{макс}} \leq d_{\text{влек}}, \quad (18)$$

$$W_0 \leq U_0. \quad (19)$$

При наличии любого из этих условий концентрация минерала в водно-аллювиальной среде становится весьма затрудненной. Это длительный процесс, в большей степени определяемый физико-химической устойчивостью минерала, нежели его гидравлическими свойствами. При соблюдении всех трех названных условий минерал практически не отличается от остальных породообразующих минералов, содержащихся в песчаной фракции аллювиального осадка, и наравне с ними участвует в миграции. Несколько возрастает способность к концентрации у тех минералов, гидравлическая крупность которых превышает величину этого показателя у минералов аллювия, составляющих основную массу. В этом случае при длительных расстояниях переноса будет все же происходить постепенная дифференциация минералов по удельному весу и накопление в обстановках с очень слабым гидродинамическим режимом. Итак, сопоставление выделенных нами механизмов концентрации россыпеобразующих минералов в водно-аллювиальной среде показывает, что они отвечают совершенно различным в энергетическом отношении режимам существования водно-аллювиальной среды. В первом из рассмотренных вариантов значительная часть кинетической энергии потока трансформируется в работу вертикальных пульсаций в придонном слое. Высокая кинетичность потока способствует развитию процессов дробления материала, высвобождению россыпеобразующих минералов из рудного вещества и гравитационной диффузии их в нижележащие слои аллювия.

По мере отступления верховий речной долины будут увеличиваться площадь ее водосбора, расходы воды и одновременно уменьшаться крупность аллювия (вследствие постепенного распада крупных обломков и естественного отбора в аллювии менее крупного, но более устойчивого галечного материала). В ходе этой эволюции речной системы энергетическая обстановка русла меняется. Поток будет затрачивать теперь кинетическую энергию главным образом на транспортировку материала. В этом случае концентрация минералов может осуществляться только в результате миграционно-остаточного и миграционного механизма, т.е. в результате в большей или меньшей степени выраженного обособления россыпеобразующих минералов в процессе транспортировки аллювия.

Очевидно, что в зависимости от того, под действием какого механизма концентрации образовалось изучаемое месторождение, у геолога будет возникать представление о малой, умеренной или значительной миграции тех или иных минералов. В заключение данной главы следует коснуться основных методических аспектов решения проблемы концентрации и рассеяния минералов в геологии россыпей.

#### КОНЦЕНТРАЦИЯ И РАССЕЯНИЯ МИНЕРАЛОВ В ГЕОЛОГИИ РОССЫПЕЙ

Общим недостатком всех попыток решения проблемы концентрации россыпеобразующих минералов является стремление подойти к нему, только опираясь на анализ русловых процессов и условий транспортировки минералов в водно-аллювиальной среде. Очевидно, что вод-

но-аллловияльная среда — это сложная, эволюционирующая во времени и пространстве система, а наши полевые или экспериментальные наблюдения, не исключая и изучения ценных минералов непосредственно в россыпи, — это не более чем моментальный снимок длительного процесса. Для того чтобы с наибольшей приближенностью к действительности судить о направленности процесса россыпеобразования и о принадлежности нашего снимка к той или иной фазе процесса, надо отчетливо представлять весь цикл россыпеобразования — от стадии выветривания коренных источников до накопления россыпеобразующих минералов в определенном месте речной долины в виде промышленной залежи.

Транспортировка минералов в русле, несомненно, лишь одно из звеньев в цепи геологических событий, ведущих к формированию россыпного месторождения или, напротив, к его уничтожению. Выше мы рассмотрели главные из этих событий: физико-химические факторы и механизмы выветривания, особенности поведения в водно-аллловияльной среде, некоторые параметры физико-географической среды и руслового процесса. Очевидно, что следующим уровнем рассмотрения обсуждаемых вопросов должен быть такой подход, который позволял бы связать затронутые явления в единый, выраженный во времени и пространстве процесс россыпеобразования. Именно обобщению в теоретическом и прикладном аспекте всех рассмотренных выше явлений и процессов посвящены заключительные разделы книги. Однако, прежде чем к ним переходить, необходимо высказать несколько обобщающих положений относительно проблемы концентрации и рассеяния минералов в том ее значении, какое она приобрела в геологии россыпей в настоящее время.

Выше мы отмечали, что у данной проблемы имеются два основных аспекта — геохимический и литогенетический. Однако ни геохимия, ни литология никогда не рассматривали россыпи в качестве одного из главных объектов своего исследования. Именно поэтому одной из будущих задач учения о россыпях является создание теории концентрации россыпеобразующих минералов в различных седиментационных средах. Эта задача будет становиться все более актуальной по мере того, как перед геологией россыпей будут вставать все более сложные задачи в отношении условий залегания ценных компонентов, условий накопления тонких минеральных фракций, сложности использования континентальных отложений и т.д.

С геохимической точки зрения главной тенденцией в поведении элементов является стремление к равномерному распределению в окружающем пространстве. Однако эта тенденция находится в диалектическом противоборстве с противоположной тенденцией — концентрированием элементов с близкими геохимическими свойствами. Л.В. Таусон, констатируя эту геохимическую противоречивость, отмечает, что, поскольку процессы концентрирования развиваются в природных системах, в которых доминируют процессы рассеяния, геохимические поля рассеяния и концентрирования обычно взаимосвязаны и не могут рассматриваться в отрыве друг от друга [165, с. 10]. Литогенетическим выражением отмеченных тенденций является, с одной стороны,

постоянное повышение степени дисперсности обломочных отложений. Это облегчает распределение масс на земной поверхности в соответствии с геопотенциалом силы тяжести, ведет к равномерному по мощности и по вещественному составу осадконакоплению в зонах максимальной устойчивости каждого данного типа обломочного материала. С другой стороны, каждый фактор миграции не действует универсально, а приводит в миграционный процесс только ту часть седиментационной системы, которая оказывается неустойчивой к данному воздействию. На стадии выветривания — это отбор минералов по химической устойчивости, в русловом процессе — отбор по физико-механическим свойствам. Таким образом, главной задачей геологии россыпей для решения проблемы концентрации и рассеяния россыпеобразующих минералов является получение количественных параметров физико-химических и литогенетических процессов, с последующей экстраполяцией этих количественно охарактеризованных процессов в масштаб геологического пространства и времени.

#### ГЛАВА IV

### КОНТИНЕНТАЛЬНЫЙ ЛИТОГЕНЕЗ И РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЕ

В предыдущих главах мы с различных позиций касались процесса россыпеобразования, однако всякий раз анализ того или иного вопроса осуществлялся по возможности таким образом, чтобы раскрыть внутренние механизмы рассматриваемого процесса в его чистом виде и вне пространственно-временных соотношений. Задачей последующих разделов является попытка связать в единое целое все результаты, полученные нами при исследовании факторов, управляющих двумя основными процессами россыпеобразования — выветриванием рудных формаций и концентрированием минералов.

#### ТЕКТОНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ РОССЫПЕОБРАЗУЮЩИХ ФОРМАЦИЙ

Вопрос о тектоно-геоморфологической эволюции металлогенетических зон в целом и отдельных формаций в частности был поставлен Н.А. Шило и рассмотрен им на примере Северо-Востока СССР [200]. Однако общетеоретическая постановка вопроса не снимает необходимости отчетливо представлять более частные, но практически весьма важные вопросы о том, каким образом осуществляется первичный размыт коренного источника, как формируется гидросеть пенеплена и как она трансформируется при тектонической активизации территории, каковы начальные стадии формирования россыпи при наличии или отсутствии кор выветривания и т.д. Пытаясь создать единую картину процесса россыпеобразования, мы стремились не уклоняться ни в сторону морфотектонического анализа, позволяющего раскрыть динамику выведения металллоносных структур в зону эрозии, ни в сторону геомор-

фологического или историко-геологического рассмотрения вопроса, позволяющего охарактеризовать этапность россыпеобразования. В соответствии с общим направлением нашего исследования мы рассматривали морфотектоническую и историческую эволюцию металлогенических зон или структур как фон, на котором эволюционирует и процесс россыпеобразования.

#### Начальные стадии формирования россыпных месторождений

Главная сложность рассмотрения начальных стадий россыпеобразования заключается в том обстоятельстве, всячески подчеркивавшемся выше, что различные россыпеобразующие формации и в разных физико-географических условиях ведут себя совершенно по-разному. Поэтому, отказавшись от традиционной схемы рассмотрения начальных стадий формирования россыпей на основе представлений о зональности коры выветривания или формирования элювиального горизонта безотносительно конкретного типа коренного источника, автор должен был бы рассмотреть начальную стадию россыпеобразования на примере каждой из выбранных им формаций. Однако совершенно очевидно, что такая задача вряд ли могла быть решена в рамках одной работы. Поэтому в дальнейшем изложении мы ограничимся рассмотрением типичных вариантов россыпеобразования и выявлением как черт сходства, так и отличительных признаков в поведении различных россыпеобразующих формаций в начальные стадии россыпеобразования.

Начальные стадии формирования россыпей всегда бывают предопределены тем состоянием коренных источников, в котором они оказываются объектом непосредственного воздействия эрозионно-денудационных процессов. При этом могут быть два типичных случая: коренной источник находится в пределах коры выветривания или находится вне ее. Вопрос о корях выветривания приобрел в геологии россыпей принципиальное значение. Он рассматривался, как уже отмечалось выше, целым рядом исследователей, а в последнее время особенно энергично постулируется С.Г. Желниным [46, 47 и др.].

Воздерживаясь пока от оценок действительной роли коры выветривания в формировании россыпей, мы должны заметить, что наличие фаз тектонического покоя и синхронно формирующихся кор выветривания в континентальном развитии крупных металлогенических зон — закономерность общеизвестная, но далеко не абсолютно обязательная. Бесспорно, что многие коренные источники золота, олова, платины и алмазов в различных районах мира, в том числе и на Северо-Востоке СССР, в той или иной степени испытали наложение линейных, площадных кор выветривания или зон окисления. Следовательно, рассмотрение начальных стадий россыпеобразования целесообразно начать со случая, когда россыпь, говоря словами Ю.А. Библина, образуется в речной долине впервые, причем за счет размыва коры выветривания.

Общие особенности ландшафта, преобладающего в пределах горной страны к моменту ее предельной пенепленизации, охарактеризованы

на примере Северо-Востока СССР в ряде работ А.П. Валпетера [17, 18]. По мнению этого исследователя, пенеппенизированная поверхность Северо-Востока представляла собой ровную, слабохолмистую равнину с уклонами поверхности водоразделов  $2-3^{\circ}$ , в пределах единичных вершин до  $6-8^{\circ}$  и очень редко до  $10^{\circ}$ . Относительные превышения водоразделов над речными поймами измеряются несколькими десятками метров.

Ю.А. Билибин полагал, что пенеппенизированная территория обладает многими чертами общности (в отношении конфигурации речной сети, уклонов рек и т.д.) с той горной страной, из которой пенеппен образовался. Он писал: "...я в 1926 г. попал в типичный пенеппен северной части Алдано-Тимитонского водораздела (южнее Алданского золотоносного района). Каково было мое удивление, когда вместо каких-то особенных почти равнинных рек я нашел самые обыкновенные горные речки... Таким образом, аллювиальные отложения, выполняющие речные долины пенеппена, могли образоваться в них еще в то время, когда пенеппен был горной страной" [9, с. 150-151].

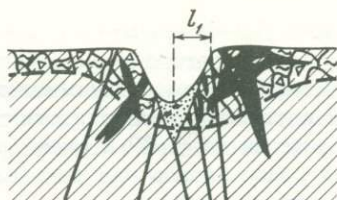
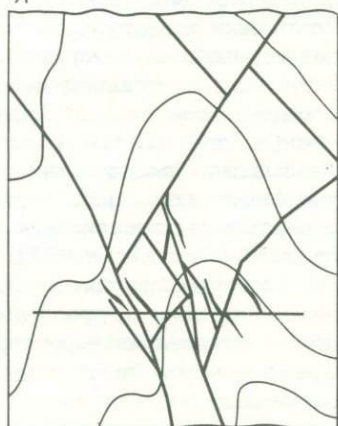
Мы привели это высказывание Ю.А. Билибина, поскольку оно весьма показательное и наглядно для понимания процессов преобразования пенеппена в результате неотектонической активизации территории и врезания водотоков с одновременно происходящими процессами формирования аллювиальных россыпных месторождений.

Возьмем за основу нашего рассмотрения вопроса тот цикл эрозии, который признавался Ю.А. Билибиным и Н.Н. Горностаевым в качестве основной схемы для анализа циклов россыпеобразования. Согласно этой схеме за время пенеппенизации формируется кора выветривания, которая на различную глубину захватывает верхние горизонты коренных пород. Несомненно, что в эту зону попадали в большой или меньшей степени и коренные источники россыпных месторождений. Очевидно, что взаимоотношения этих источников с корой выветривания должны были быть весьма различными, зависящими прежде всего от состава рудного вещества и целого ряда других факторов. Последовательность трансформации поверхности выравнивания с выведенными в зону корообразования коренными источниками в эрозионно-денудационную поверхность можно представить в виде обобщенной схемы (рис. 48).

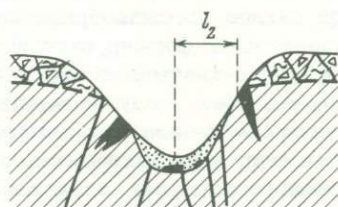
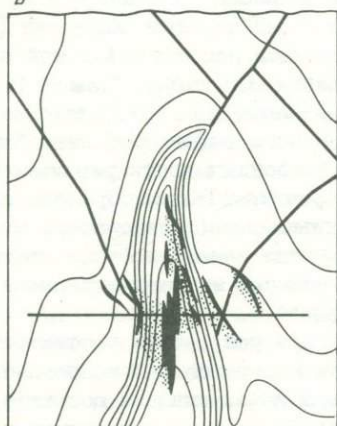
В начальную стадию россыпеобразования, т.е. в стадию выветривания коренных источников, возможны два основных варианта развития зоны гипергенеза — по обычному типу формирования коры выветривания и по типу формирования зоны окисления. Оба эти варианта тесно связаны с деятельностью подземных вод и инфильтрацией поверхностных вод. С.С. Смирнов [152] отмечает, что схематически циркуляция инфильтрующихся с поверхности вод представлена тремя зонами (рис. 49). Однако в реальных условиях эта схема выдерживается крайне редко. Различия в степени трещиноватости, раскрытости трещин, в их ориентировке приводят к различиям в скорости просачивания вод и конфигурации зоны просачивания, вызывая даже в случае однородности рудного тела прихотливое расположение в зоне окисления блоков различно измененного сульфидного материала



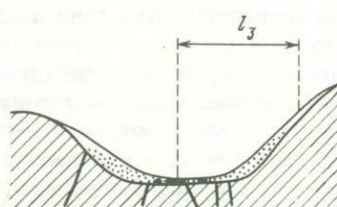
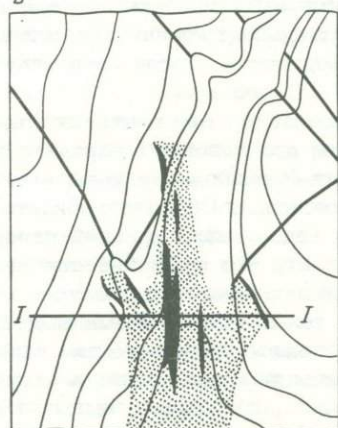
A



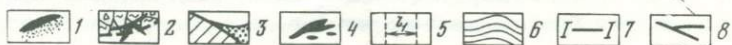
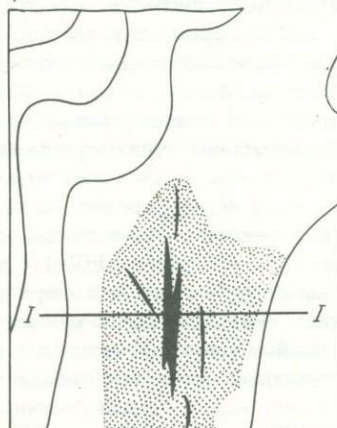
B



B



Г



[152, с. 12]. Наиболее интенсивные изменения в верхних горизонтах гипергенной переработки рудных тел происходят в пределах зон *a* и *b* (см. рис. 49). В застойной зоне просачивающиеся воды обычно уже не содержат свободного кислорода и оказываются почти в равновесии с материалом, слагающим застойную зону. Условия зоны истечения также близки к застойной зоне, поэтому, согласно С.С. Смирнову, в пределах зоны просачивания сульфиды неустойчивы, в застойной зоне, наоборот, устойчивы в зоне же истечения наблюдаются некоторые средние условия. Таким образом, помимо вещественного состава рудного материала, важное значение имеет его проницаемость. Возвращаясь к изложенным выше данным, отметим, что вопрос о проницаемости рудного вещества имел важное значение и для физического выветривания, что еще раз напоминает о единстве физико-химических процессов выветривания. Проницаемость первичных неизмененных руд в целом исследована слабо. Больше данных имеется о пористости, которая для руд сравнительно плотного сложения колеблется в пределах 0,3–20%, составляя в среднем 8,5% [158]. Пористость горных пород значительно ниже, колеблется в гораздо более узком интервале и составляет в среднем 1,8%. Более высокая пористость руд, связанная с большей неоднородностью по сравнению с породами и с пострудной катаклазированной и дислоцированностью кристаллов, способствует их большей проницаемости и преимущественной инфильтрации выпадающих осадков в пределах именно рудных источников. Они становятся на поверхности своеобразными воронками, через которые поверхностные воды могут просачиваться на глубину.

Помимо общей пористости, важное значение имеет размер трещин и пор, поскольку далеко не все трещины разрешают фильтрацию воды. Соотношение эффективной и неэффективной пористости в разных породах также различно. В этом отношении тела равномерного строения, зернистости и соответственно пористости способствуют равномерному просачиванию поверхностных вод и формированию площадной коры выветривания. Локальные рудные тела вследствие большей удельной проницаемости имеют тенденцию к формированию

Рис. 48. Принципиальная схема пространственного соотношения коренных источников и россыпных месторождений на разных стадиях (А–Г) тектоно-геоморфологической эволюции металлогенических структур

1 – рудные тела и сопровождающие их ореолы экзогенного рассеяния; 2 – рудные тела (в разрезе) с наложенной корой выветривания; 3 – отложения с рассеянными содержаниями россыпеобразующих минералов на склонах и в поймах долин; 4 – россыпные концентрации в аллювии (в разрезе и на плане); 5 – расстояния перемещения рудных обломков от выходов рудных тел на склонах до русла, увеличивающиеся в процессе развития долины; 6 – изолинии рельефа; 7 – линия профиля, разрез по которой дан в верхней части рисунка; 8 – разрывные нарушения

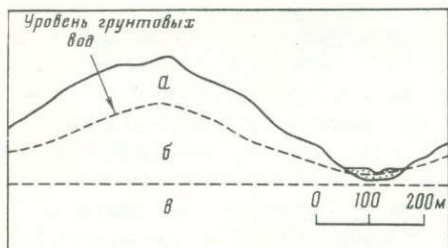


Рис. 49. Схема зональности грунтовых вод при формировании зоны гипергенеза (по В. Линдгрёну - С.С. Смирнову)

а - зона просачивания;  
б - зона истечения; в - зона застойных вод

линейных кор выветривания (при более высокой проницаемости по сравнению с вмещающими породами) или, напротив, положительных форм рельефа с редуцированной зоной окисления при низкой проницаемости.

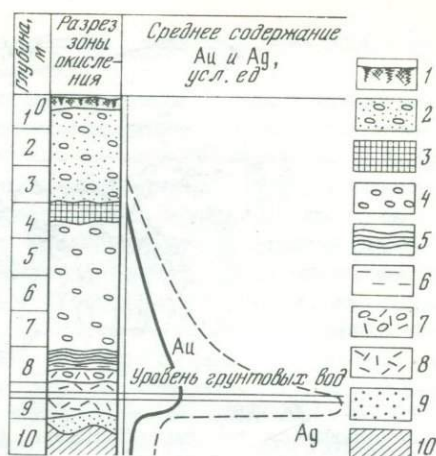
Данных о раскрытости трещин на глубине имеется довольно мало. Считается [109], что раскрытость трещин на глубине может достигать миллиметров и даже нескольких сантиметров и более. Подтверждением служат примеры из бурового дела (поглощения буровой жидкости, провалы инструмента и т.д.). Л.А. Матвеева [90] отмечает, что при ширине пор от  $2 \cdot 10^{-7}$  до  $3,8 \cdot 10^{-6}$  см выветривание происходит крайне медленно по типу диффузионного массообмена. При размере пор  $3,8 \cdot (10^{-6} - 10^{-3})$  см появляется свободная вода, однако скорость обменных процессов остается очень низкой. И только при наличии пор размером более  $10^{-3}$  см водные растворы начинают циркулировать под действием силы тяжести и градиентов давления. В этом случае выветриванию способствует конвекционный массоперенос в системах трещин. Если учесть, что в микротрещинах в реакциях участвует не вся вода, а только та, которая непосредственно соприкасается с твердой фазой пород и рудного вещества, то станет понятно, что выветривание на глубине зоны окисления происходит крайне медленно. Глубина зоны окисления определяется уровнем грунтовых вод. В. Линдгрён [76] отмечал, что в золотоносных кварцевых жилах Калифорнии большое количество воды в трещинах встречается до глубины 240-300 м. Ниже этого уровня рудничные забои и штреки были сухими или незначительно увлажненными. В зависимости от степени трещиноватости, рельефа и количества осадков горизонт обводнения, по В. Линдгрёну, может достигать под возвышенностями глубины 400 и даже 600 м.

Следовательно, если рудное месторождение оказывается вблизи дневной поверхности, которая испытывает пенеппенизацию, то гипергенные процессы захватывают и определенные горизонты рудных тел. Глубина этих горизонтов регулируется уровнем грунтовых вод, проницаемостью рудного вещества и его вещественным составом.

Как было показано выше, если рудные тела представлены существенно кварцевыми рудами, то формирование зоны окисления затруднено. Отмечавшаяся выше сохранность кварцевых жил в корках выветривания приводит к тому, что они лишь частично деформируются, распадаются на отдельные крупные блоки и фрагменты. При этом сохраняется общее направление жил, а преобладание механических де-

Рис. 50. Схема строения зоны окисления сульфидного месторождения (по В.М. Крейтеру и др.)

1 - почвенный слой; 2 - суглинок делювиальный; 3 - бурый железняк скорлуповатонатечный; 4 - ярозит; 5 - бурый железняк пористый; 6 - глинка с галогенидами серебра; 7 - сыпучка кремнистая ярозитизированная; 8 - сыпучка кремнистая; 9 - сыпучка колчеданная; 10 - колчеданная руда



формаций рудного тела "исключает возможность обогащения золотом продуктов выветривания" [47, с. 30], Следовательно, роль коры выветривания, наложенной на малосульфидные руды золото-кварцевой формации, практически не проявляется в первичном, как бы предварительном, обогащении верхних горизонтов рудных тел. Это обогащение может проявиться лишь в той степени, в какой процессами химического выветривания будут удалены неустойчивые и оказавшиеся доступными для прямого воздействия минералы, т.е. сульфиды, карбонаты и некоторые другие, содержащиеся в рудных телах этой формации в долях процентов.

Совершенно иная обстановка возникает при выветривании умеренно или значительно сульфидизированных руд. В этом случае бывает отчетливо проявлена зональность окисления в виде чередования (сверху вниз) подзоны окисления руд, подзоны выщелачивания и подзоны вторичного сульфидного обогащения или цементации. В литологическом отношении зона окисления представлена горизонтами интенсивно выветрелых пород (рис. 50), среди которых преобладают глины, разнообразные дресвяники (баритовые, кварцевые) и сыпучки. Третий тип наложения коры выветривания развивается на тех россыпеобразующих формациях, рудные тела которых представляют собой площадные выходы равномернозернистого строения или с равномерным распределением в рудном материале россыпеобразующих минералов. Чаще всего этот морфологический тип выветривания проявляется на коренных источниках платиновых металлов, алмазов, редких и рассеянных металлов. Обобщенный профиль такой коры выветривания приведен на рис. 51. Таким образом, формирование коры выветривания на разные типы россыпеобразующих формаций оказывает весьма различное влияние. Минимальные изменения будут наблюдаться в малосульфидных телах золото-кварцевой формации, более значительные проявления зон окисления преимущественно линейного типа будут свойственны рудным телам с нарастающей степенью сульфидности, а для равномерно распределенных минералов в продуктивных

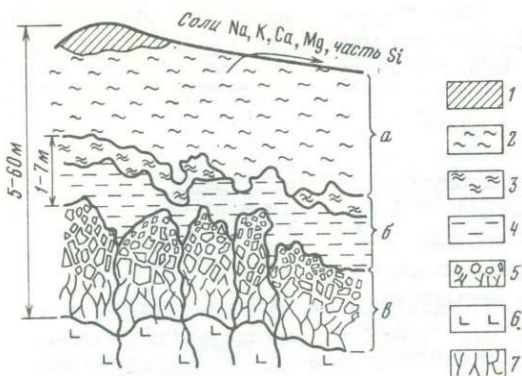


Рис 51. Обобщенный разрез коры выветривания площадного типа, развивающейся по гипербазитам (дунитам, габбро и др.), по Ф.И. Вольфсону и Е.М. Некрасову [24]

*a* – верхний железистый слой желтых и бурых глин; *б* – средний слой зеленоватых и голубоватых гидросиликатных натечных, порошковатых и землистых масс; *в* – нижний силикатно-гидросиликатный слой коры выветривания, представленный полуразложившейся щебенкой и коренной породой; стрелкой показан вынос элементов; 1 – губчатые и ячеистые скопления халцедона и кварца; 2 – глины и рыхлые скопления гидроокислов железа; 3 – глины с гидросиликатами никеля, марганца, железа; 4 – землистые, натечные и порошковатые массы гидросиликатов никеля, магния, железа, а также опал; 5 – полуразрушенная порода; 6 – трещиноватые коренные породы; 7 – трещины

породах морфологическим выражением зоны гипергенеза будет кора выветривания площадного типа. Соответственно этому и начальные стадии россыпеобразования в виде формирования элювиальных продуктивных горизонтов будут свойственны различным формациям в разной степени: в минимальной – наиболее устойчивым, в максимальной – наименее устойчивым.

Анализ многочисленных литературных материалов по корам выветривания и полевые наблюдения в пределах реликтовых фрагментов кор выветривания приводят к выводу, что формирование элювиальных россыпей происходит в тесном генетическом единстве с развитием коры выветривания и полностью определяется типом россыпеобразующей рудной формации. В периоды максимального развития пенеппенизации конфигурация речной сети подчиняется тем очертаниям, которые предопределены тектоническими, минерализованными и другими зонами, существовавшими в тот период, когда пенеппен был еще типичной горной страной. При этом наиболее устойчивые петрографические типы пород оказываются выраженными положительными формами рельефа. В силу своей повышенной резистентности процессам выветривания месторождения золото-кварцевой малосульфидной формации также оказываются часто приуроченным к положи-

тельным формам рельефа, на что обращал внимание еще Ю.А. Билибин.

Формирование элювиальных россыпей в эпохи плагации predetermined тем количеством неустойчивых минералов и подвижных компонентов, которые находятся в составе матричного вещества. Ю.А. Бурмин отмечает, что алмазы, кварц, топаз, турмалин, корунд хорошо сохраняются во всех зонах кор выветривания, вплоть до каолиновой [14, с. 39]. Этот автор отмечает также, что относительное содержание полезных минералов в коре выветривания обычно выше, чем в материнских породах, что объясняется общим уменьшением их объемного веса при сохранении абсолютного количества запаса ценных минералов. Однако важно подчеркнуть, что это правило сохраняется далеко не всегда. В частности, выше мы уже отмечали, что относительного обогащения в элювиальную стадию почти не происходит в существенно кварцевых рудных источниках. По мере увеличения сульфидности руд вероятность элювиального россыпеобразования возрастает. Однако, если коренной источник очень неустойчив, например кимберлитовые тела, то при их выветривании образуются отрицательные формы рельефа в пределах трубок и происходит разубоживание первичных концентраций за счет поступления боковых пород [121].

Итак, в целом роль кор выветривания для начальных стадий россыпеобразования представляется достаточно ясной. В коре выветривания происходит разрушение матричного рудного вещества и высвобождение россыпеобразующих минералов. Однако этот процесс имеет весьма широкий спектр своего проявления — от минимально выраженного для золото-кварцевых месторождений до значительного обогащения (в 1,5–2 раза) легко выветривающихся типов коренных источников. Следующая стадия россыпеобразования связана с размытием кор выветривания и зон окисления.

#### Эрозионно-денудационное расчленение поверхностей выравнивания и кор выветривания

Уничтожение пенеплена начинается с неотектонической активизации металоогенической зоны в виде дифференцированных движений различных блоков, горстов, купольных структур и т.д. Неотектоническая активизация приводит к искажению гравитационного поля в верхних частях коры, к возникновению разности геопотенциалов, что и обуславливает увеличение кинетической энергии рек и их эродирующей способности. Реки начинают энергично врезаться в ранее накопленные отложения, а затем и в коренные породы. При этом существовавшие зоны окисления и коры выветривания оказываются весьма быстро прорезанными речной эрозией. Это достигается тем более легко, чем тоньше была кора выветривания или меньше мощность зоны окисления. В этом отношении следует учесть одно весьма существенное обстоятельство. Среди сторонников концепции россыпегенерирующей роли кор выветривания бытует мнение, что эпохи выветривания подготавливают значительные массы рыхлого обломочного материала, которые и являются главным коллектором ценных

россыпеобразующих минералов. Однако этот вопрос достаточно сложен и не имеет однозначного решения. В частности, коры выветривания и зоны окисления, локализующиеся в днищах долин речной сети пенеплена, имеют минимальную мощность. Ю.А. Билибин подчеркивал это обстоятельство, отмечая, что в горных странах с большими относительными высотами, где местность хорошо дренирована глубокой сетью речных долин, уровень грунтовых вод под возвышенностями является значительно пониженным и процессы окисления распространяются глубже, чем в пенепленизированной местности, где уровень грунтовых вод расположен сравнительно неглубоко [9].

В связи с отмеченным обстоятельством после начала активизации горной страны коры выветривания под речными долинами оказываются быстро размытыми. Возникает вопрос о скорости размыва, причем скорость эрозии имеет решающее значение для образования зоны окисления. Если скорость эрозионного среза больше скорости формирования зоны окисления, то никакой зоны окисления не может образоваться, так как только что возникшие продукты окисления будут удаляться эрозией и на поверхности все время будет свежий сульфидный материал [152, с. 16]. Таким образом, при анализе процессов эрозионной переработки пенепленизированной поверхности и кор выветривания необходимо иметь в виду, что под речными долинами мощность коры или зоны окисления наименьшая. Второй важной особенностью начальных стадий размыва коры выветривания является то, что именно под речными долинами кора выветривания уничтожается в первую очередь и русло реки входит в соприкосновение с невыветрелыми горизонтами рудных тел или вмещающих пород. В то же время на склонах и в водораздельной части долины материал коры выветривания продолжает какое-то время сохраняться, медленно перемещаясь в долину (см. рис. 56,Б). При дальнейшем врезании гидросети водораздельный и склоновый материал постепенно будет смещен в долину, полностью переработан водным потоком, поэтому мы можем не иметь никаких признаков присутствия в долине фрагментов коры выветривания.

В связи с характеризуемой нами схемой эрозионного уничтожения коры выветривания или зоны окисления, которая не является плодом нашего воображения, а подтверждается всякий раз, когда удастся изучить этот своеобразный процесс, возникает ряд вопросов, без ответа на которые нельзя решить проблему выветривания коренных источников при россыпеобразовании. Первый такой вопрос — объем и характер материала, вовлекаемого в эрозионную переработку. Ясно, что в первую очередь будет перемыт тот объем коры выветривания, который попал в зону вреза, т.е. флювиальной деятельности русла. Этот объем относительно невелик, следовательно, и количество россыпеобразующих минералов, которые останутся от перемытого слоя коры выветривания, будет невелико. Дальнейшее поступление россыпеобразующих минералов следует связывать с перемывом склоновых и водораздельных масс. Кроме того, если горизонт коры выветривания, сформировавшийся под днищем долины, заключал в себе руд-

ные тела золото-кварцевой малосульфидной формации, то процессы выветривания могли обусловить только частичную дезинтеграцию этих рудных тел и водный поток, приходя в соприкосновение с эродирруемыми жилами, встречает обычный жильный кварц с частично ослабленными межзерновыми и межкристаллитными связями.

Следовательно, при размыве коры выветривания в русле ручья или реки скапливается грубообломочный существенно кварцевый материал или обогащенный наиболее устойчивыми обломками из перемываемых отложений коры выветривания. Анализ геологических материалов по россыпным месторождениям Калифорнии, Австралии, Индонезии и многим районам Советского Союза показывает, что аллювий водотоков, размывающих кору выветривания, всегда представлен наиболее устойчивыми к выветриванию кремнистыми породами, иногда с преобладанием кварцевых обломков. Крупность аллювия диктуется теми гидродинамическими характеристиками, которые задают темп неотектонического поднятия (уклоны русла, скорость поступления склонового материала) и гидрологические условия (количество осадков, площадь водосбора). Итак, в первую фазу активизации территории гидросеть испытывает врезание, но далеко не одинаковое во всех своих звеньях. Некоторые водотоки в пределах наиболее активных блоков успевают прорезать кору выветривания, некоторые только углубляются в выветрелые аллювиальные отложения предшествовавшей стадии аккумуляции и т.д. При этом в каждом конкретном случае на подошве достигнутого вреза происходит концентрация некоторого количества россыпеобразующих минералов. Надо заметить, что условия концентрации минералов при размыве коры выветривания довольно неблагоприятны. Хотя в русле и присутствует обломочный материал, но он обогащен глинистым веществом, мешающим развитию процесса дифференциации.

После начальных фаз врезания, когда русло уже выработает интративную пойму на некотором новом гипсометрическом уровне, начинается интенсивное поступление склонового материала. Лоренс [230, 231] показал, что движение склонового материала в тропических областях происходит интенсивно и подчиняется тем же закономерностям, что и вне тропических зон. Поэтому если размывающий кору выветривания водоток отличается слабой транспортирующей способностью, то он не успевает выносить поступающий со склонов материал и вместо врезания в речной долине наблюдается агградация, по своей сущности сходная с агградацией речных долин в субполярных областях. Ранее сформировавшиеся россыпные концентрации на поверхности максимального вреза русла вскоре оказываются перекрытыми слабо сортированным материалом переотложенной коры выветривания с растянутой по всему разрезу непромышленной шлиховой минерализацией.

Рассматривая принципиальную схему размыва эродирующим водотоком коры выветривания или минерализованной зоны с приуроченными к ней рудными телами (рис. 52), попытаемся ответить на вопрос, какие преимущества для формирования россыпного месторождения создает размыв коры выветривания по сравнению с обыч-

$$\left. \begin{matrix} l_1 \\ l_1' \end{matrix} \right\} < \left. \begin{matrix} l_2 \\ l_2' \end{matrix} \right\} < \left. \begin{matrix} l_3 \\ l_3' \end{matrix} \right\} < \left. \begin{matrix} l_4 \\ l_4' \end{matrix} \right\}$$

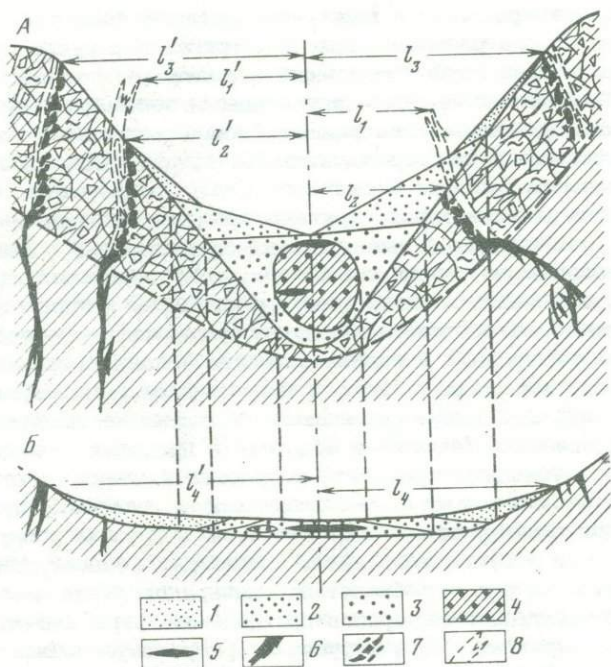


Рис. 52. Начальная стадия образования аллювиальной россыпи при размыве коры выветривания и коренных пород (А) и ее преобразование в ходе эволюции долины (Б)

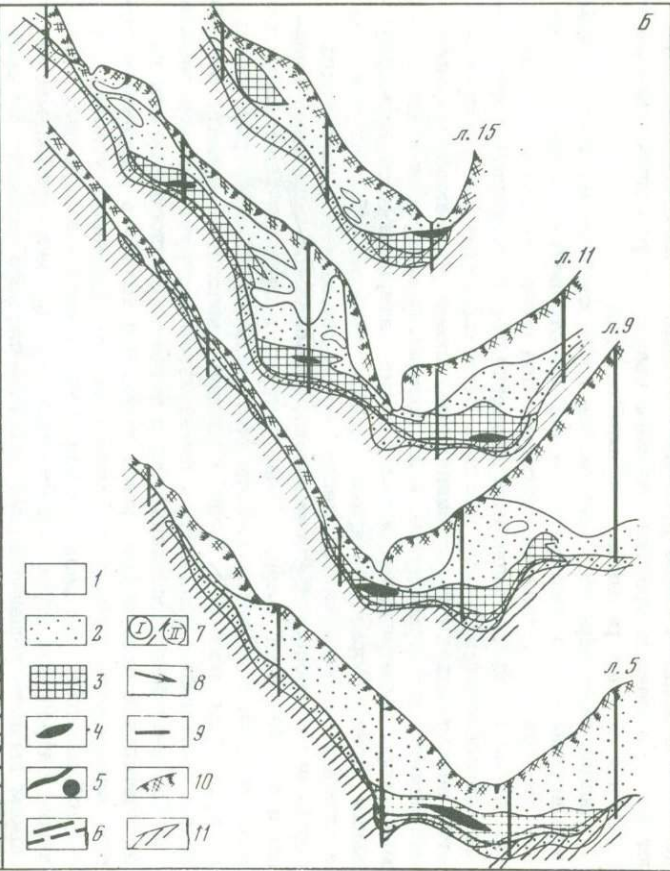
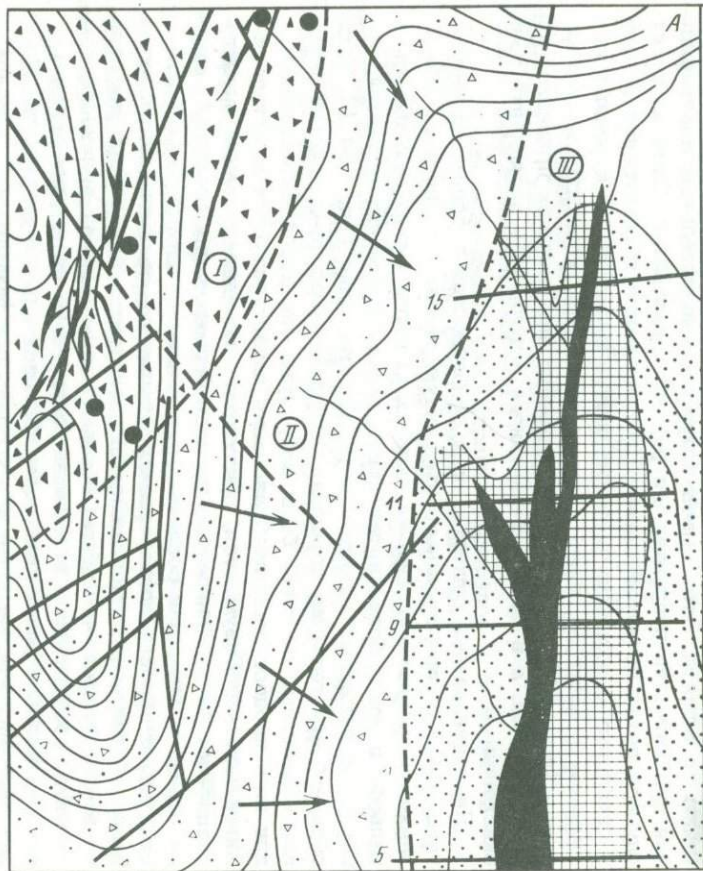
1 - весьма рассеянные концентрации минералов в делювии; 2 - рассеянные, но устойчиво фиксируемые концентрации; 3 - забалансовый контур россыпи; 4 - концентрации, близкие к промышленным; 5 - промышленный пласт россыпи; 6 - рудные тела; 7 - то же, затронутые выветриванием; 8 - прежнее положение жил;  $l_1^1, l_1, l_2^1$  и  $l_2$  и т.д. - расстояния по горизонтали (в плане) от коренных источников до тальвега долины, увеличивающиеся в ходе ее эволюции

ной эрозийной деятельностью водотоков в невветрелых породах. Отвечая на этот вопрос, мы должны признать, что формирование коры выветривания не приводит к увеличению количества ценных минералов. Кора выветривания увеличивает степень разрушенности потенциально продуктивного материала. Однако разрушившееся рудное тело и содержащиеся в нем ценные минералы оказываются в очень неблагоприятных условиях флювиального обогащения при перемыве. Кроме того, если коренной источник был представлен кварцевыми жилами, то степень высвобождения ценных минералов (золота, касситерита) в коре выветривания крайне мала и довысвобож-

ление происходит в сфере руслового потока, о чем свидетельствуют многочисленные сростки золота с кварцем в россыпях, сформированных за счет размыва кор выветривания.

Анализ разнообразных материалов по россыпным месторождениям, формирующимся за счет размыва кор выветривания и лишенным таких признаков, заставляет поставить под сомнение положительное и тем более особо благоприятное значение кор выветривания для россыпеобразования в речных долинах. Во всяком случае, представляется несомненным, что принципиальная схема россыпеобразования сохраняется и в том случае, если россыпь формируется и при размыве коры выветривания, и без участия материала коры выветривания. Всегда формируется центральная, наиболее обогащенная зона в аллювии, во всех климатических зонах наблюдается клиновидная форма вреза эродирующего водотока, формируются склоновые шлейфы и т.д. Обломки кварца с содержащимися ценными минералами по мере углубления долины должны проходить все большее расстояние до русла (см. рис. 52). Если в условиях холодного климата эти обломки продолжают испытывать интенсивное деструкционное воздействие (за счет криодислокаций), то в условиях теплого климата их окончательное разрушение может произойти только в результате гидромеханического дробления. Таким образом, сравнивая условия россыпеобразования при размыве водотоком кварцевых коренных источников, затронутых корой выветривания или не затронутых, мы не можем выявить решающие преимущества первого варианта по сравнению со вторым. Этот вывод получает дополнительные подтверждения при изучении современного россыпеобразования. Один из таких случаев детально изучен нами. Проследивание концентраций золота в склоновых отложениях выявило четкие переходы от коренных источников в водораздельной части к россыпным концентрациям в аллювии (рис. 53). При этом не отмечено ни малейших признаков кор выветривания, а в пределах коренного источника — проявлений зоны окисления.

Не улавливается существенных особенностей в облике рельефа (рис. 54, А), переживающего умеренную стадию эрозионного обновления, сохранившего еще на склонах реликты кор выветривания, и рельефа в зонах более интенсивных неотектонических поднятий, совершенно лишенных остатков коры выветривания (рис. 54, Б). Таким образом, при размыве коренных источников золото-кварцевой формации независимо от того, были затронуты они корой выветривания или нет, процесс россыпеобразования характеризуется многими общими чертами. Разумеется, присутствие кор выветривания вносит специфические особенности в процесс формирования россыпей, иногда отрицательные для россыпеобразования, но далеко не в такой степени, чтобы обусловить резкое увеличение продуктивности аллювиальной толщи в речной долине. Не следует забывать при трактовке этого вопроса, что общий объем (точнее, масса) полезного компонента, поступившего в аллювий, зависит не от мощности коры выветривания, а от объема переработанного рекой материала. Но эта величина диктуется не климатическими факторами, а темпом



- |  |   |  |    |
|--|---|--|----|
|  | 1 |  | 7  |
|  | 2 |  | 8  |
|  | 3 |  | 9  |
|  | 4 |  | 10 |
|  | 5 |  | 11 |
|  | 6 |  |    |

неотектонических поднятий и обусловленным новейшими движениями чередованием интративных и перстративных динамических фаз в развитии речных долин.

Существенно иной может оказаться роль кор выветривания и зон окисления при эрозионном расчленении металлогенических структур с преобладанием месторождений золото-сульфидной и других формаций с более податливыми к химическому выветриванию рудными телами. Нельзя не согласиться с выводами С.Г. Желнина [47] и других исследователей о том, что для формаций с высоким содержанием неустойчивых минералов роль химического выветривания возрастает пропорционально степени их сульфидности, карбонатизированности и присутствию других признаков подверженности химическому выветриванию. При этом следует иметь в виду, что главный фактор, благоприятствующий россыпеобразованию за счет таких руд, — это более полное, чем при других типах выветривания, высвобождение россыпеобразующих минералов тонких классов крупности полезного компонента. Значительно увеличивается и вероятность формирования элювиальных россыпей за счет коренных источников повышенной сульфидности. Кроме того, могут возникать весьма своеобразные россыпи, названные нами суффозионно-остаточными [194]. Сущность их в следующем.

Изучение россыпей, связанных с корами выветривания, а также анализ обширных геологических материалов по россыпным месторождениям Северо-Востока СССР (особенно в районах с хорошо сохранившимися реликтами кор выветривания на водоразделах и в основании континентальных отложений кайнозойских впадин) привели к выводу о значительной роли в образовании россыпных концентраций подземных вод, в частности процессов суффозии. Обеспечивая вынос от 20 до 65% и более первичного объема вещества минерализованной зоны или рудного тела, суффозия в ряде случаев является главным литогенетическим механизмом, обуславливающим накопление россыпных концентраций. При этом выделяются три варианта геолого-геоморфологических обстановок, в которых суффозионно-остаточное накопление характеризуется различными соотношениями объемов вынесенного и остаточного материала, отражающими разные

---

Рис. 53. Образование аллювиальной россыпи за счет коренных источников золото-кварцевой малосульфидной формации, вид в плане (А) и в сечении различных участков россыпи (Б)

1 — золотоносность не установлена; 2-4 — слабая, близкая к промышленной и промышленная (4) золотоносность; 5 — жильные проявления и точки штупного опробования с выделениями золота в кварце; 6 — разрывные нарушения; 7 — зоны элювиального (I), делювиального (II) рассеяния и флювиального концентрирования (III); 8 — преобладающие направления поступления склонового материала к руслу; 9 — положение разведочных линий на плане и шурфов в разрезе; 10 — почвенный покров; 11 — совершенно невыветрелые коренные породы

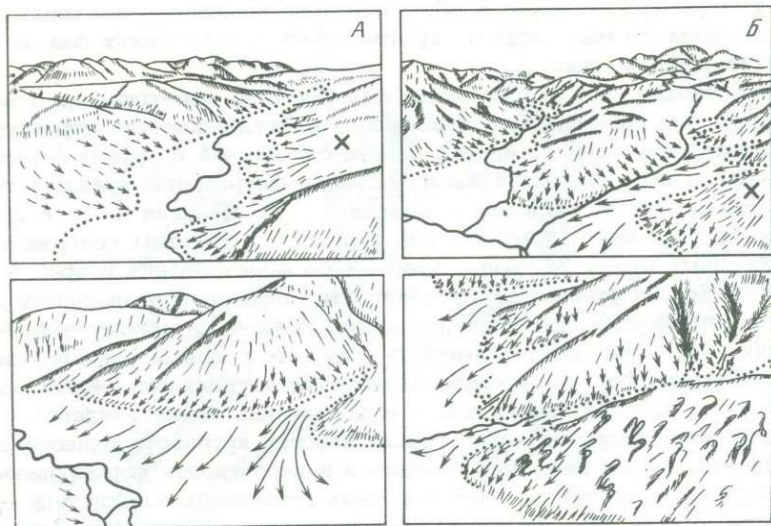


Рис. 54. Характерный рельеф слабо (А) и более интенсивно (Б) расчленяемого эрозией гидросетью пенеплена

Крестиком помечены участки, более крупно изображенные на нижних рисунках (ретушированные фотоснимки)

этапы или стадии формирования таких россыпей: водораздельные седловины, приседловинные врезы и цокольные основания кайнозойских впадин. На водораздельных седловинах в зонах средне- и низкогогорья наблюдается высокая степень сохранности линейных кор выветривания. Они представлены здесь щебнем (до 50% по объему) с песчано-глинистым цементом, довольно пестрых тонов, но с преобладанием светло-желтых, оранжевых и ржаво-красных оттенков (в сухом состоянии). В глинистой фракции продуктов выветривания, по данным термического, рентгеноструктурного и электронно-микроскопического изучения, преобладает каолин.

На участках развития кварцево-жильных образований фиксируются обильные развалы кварца, причем количество обломков кварцевых жил в материале коры выветривания практически не отличается от содержания их в перекрывающем делювии, а в составе слабо измененных коренных пород кварцевого материала заметно меньше. Золото в коре выветривания распределено равномерно по всему профилю, при этом содержания его не превышают знаковых. Частицы золота всех фракций имеют угловатые очертания, очень часто находятся в сростании с жильным кварцем, наиболее крупные золотины иногда округлены на выступах и ребрах граней. В шлихах присутствуют наиболее устойчивые минералы, в легкой фракции преобладает кварц, в тяжелой – ильменит, циркон, магнетит. Характер вертикального распределения золота и минералов тяжелой фракции свидетельствует о том, что на водораздельных седловинах суффозионный механизм концентрации в целом выражен слабо. Это связано с преоб-

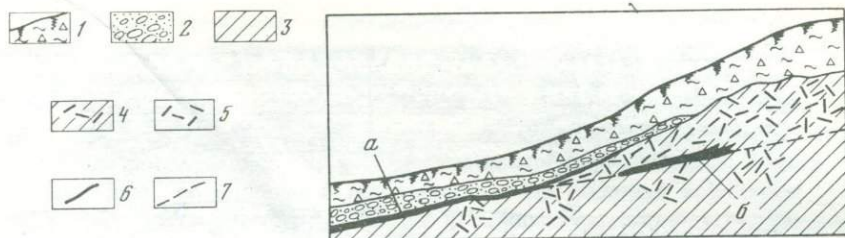


Рис. 55. Соотношение обычной аллювиальной (а) и суффозионно-остаточной россыпи (б) в одном из районов Северо-Востока СССР

1 - почвенно-растительный слой и делювиально-аллювиальные щебнисто-глинистые отложения; 2 - аллювиальные галечно-песчаные отложения; 3 - коренные породы; 4 - зона незначительной трещиноватости (иногда с сульфидно-кварцевой минерализацией); 5 - зона сильной трещиноватости и выветрелых пород; 6 - россыпные концентрации; 7 - контакт между выветрелыми и слабо измененными плотными коренными породами, маркирующий уровень грунтовых вод

ладанием вертикального просачивания поверхностных вод и со слабым переносом вещества в горизонтальном направлении.

Заметно шире проявлены суффозионные процессы в пределах приседловинных речных врезов и тяготеющих к ним зон истечения подземных вод в понимании С.С. Смирнова. В этом случае аллювиальные россыпи формируются за счет перемива поверхностным водотоком слабо золотоносных продуктов линейной коры выветривания, развившейся по золоторудной зоне. Строение такой россыпи (рис. 55, а) обычно имеет характерные признаки флювиального генезиса: продуктивный слой локализуется в нижней части разреза галечников, золото представлено хорошо окатанными частицами.

Суффозионно-остаточная россыпь (рис. 55, б) иногда кулисообразно расположена под аллювиальной и прослеживается по контакту коры выветривания и химически слабо измененных пород, как бы маркируя границу инфильтрации поверхностных вод на глубину. В направлении к водоразделу суффозионная россыпь постепенно обедняется и через непромышленные содержания переходит в рассеянные (знаковые) проявления. Золото в этой россыпи, особенно частицы мельче 2 мм, имеет низкую степень окатанности, угловатые, крючковатые, занозистые формы, весьма часты сростки с кварцем. У крупных золотин наблюдается сглаженность краев и выступов.

Весьма характерными чертами суффозионно-остаточного генезиса обладают россыпи, залегающие на докольном основании кайнозойских впадин (обычно вблизи их краевых частей или у выступов основания). Продуктивный слой одной из изученных россыпей на 85-90% состоит из обломков кварца, несущего явные следы химического воздействия. Характерно присутствие крупных обломков кварца (фракция 200-100 мм в количестве 22,0%, 100-50 мм - 28,5%, 50-25 мм - 23,6%) и очень незначительное - материала песчано-алевритовой размерности (фракции 0,1 мм содержится 4,3%).

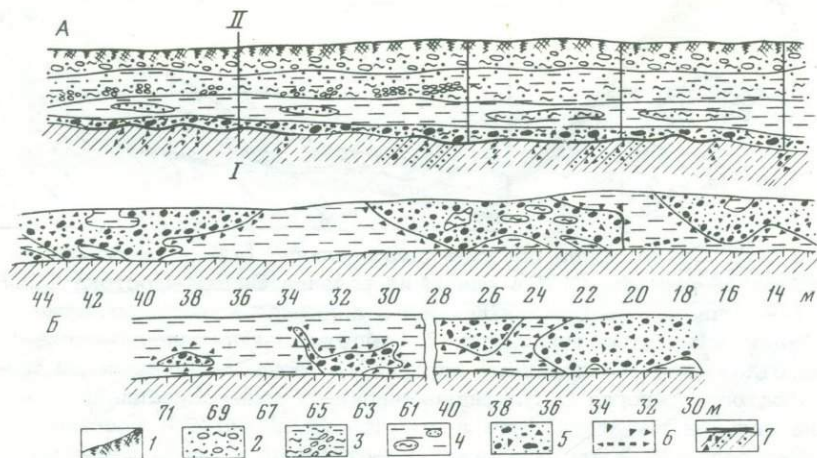


Рис. 56. Продольный разрез по глубоко залегающей суффозионно-остаточной россыпи (А) и фрагменты зарисовки стенки выработки (Б), пройденной вкрест простирания россыпи по продуктивному слою (в сечении 1-11, зарисовка геологов Н. Агеевой и Ю. Баркана)

1 - почвенный слой; 2 - горизонт верхнеплейстоценовых галечников; 3 - песчано-алеврит-пелитовые отложения с линзами косо-слоистых гравелитов неоген-четвертичного возраста; 4 - отложения преимущественно пелитового состава с линзами песка и признаками переотложенной коры выветривания палеогенового возраста; 5 - базальные слои глыбово-дресвянистого кварцевого материала с малым количеством алеврит-пелита кварцевого состава и признаками остаточного накопления (в основании слоя - концентрации золота); 6 - щебень и дресва (иногда в виде прожилков) кварца; 7 - залегание концентрации золота на выветрелых сланцах с сульфидной минерализацией и пикеты маркшейдерской сетки по подошве штрека

Весьма мало также суглинистого цемента, в котором локализуется золото (доли процента), что свидетельствует о высокой степени "промытости" продуктивного кварцевого горизонта.

В тяжелой фракции шлихов, кроме золота и других устойчивых минералов, фиксируется обилие сульфидов железа и мышьяка совершенно свежего облика. Прекрасно ограненные кристаллы пирита и арсенопирита присутствуют также в элювиальном слое коренных пород, на которых залегает пласт россыпи. Такое сочетание возможно лишь в том случае, если обломочный кварцевый горизонт подвергался суффозионному воздействию инфильтрационных вод, практически лишенных свободного кислорода. Вполне допустимо существование даже восстановительной среды в промываемом грунтовыми водами горизонте, способствовавшей регенерации граней кристаллов сульфидов. Об этом же говорит и отсутствие следов ожелезнения ("рубашки") на частицах золота, столь обычных для золота поверхностных аллювиальных россыпей древнего возраста.

Другой особенностью суффозионно-остаточных россыпей впадин является залегание продуктивного слоя на слабонаклонной поверхности, наличие обратных уклонов, местных западин, выступов и т.д. (рис. 56, А), а также весьма сложная форма продуктивного тела (рис. 56, В). Крупность кварцевых обломков в промышленном пласте данной россыпи такова, что они не могли перемещаться водным потоком даже со свободной поверхностью при уклонах коренного ложа, равных долям метра на километр длины. Кварцевые обломки несут следы некоторой обработки подземными водами. В некоторых случаях слегка сглажена только верхняя поверхность обломков, а нижняя сохраняет оскольчатый неровный излом, характерный для поверхности раскола кварца. Золото россыпи мелкое, встречаются небольшие самородки, многочисленные сростки золота с кварцем.

Сравнение суффозионно-остаточных россыпей, формирующихся в различных геолого-геоморфологических обстановках, показывает, что они образуют широкий спектр переходов от типично суффозионных, не испытавших флювиального воздействия поверхностных водотоков, до суффозионно-остаточных, претерпевших частично флювиальное воздействие. Вполне понятно также, что вероятность формирования таких образований увеличивается в зависимости от обогащенности минерализованных зон слабоустойчивыми минералами. В этом случае интенсивное развитие зоны окисления создает условия для образования рудного карста или "туннельной эрозии" в понимании Бэйли [223].

Наконец, коснемся кратко некоторых особенностей эрозионного расчленения коренных источников с площадным характером выветривания. Такие типы рудных тел характерны для россыпеобразующих формаций платины и алмазов, а также для некоторых других минеральных типов россыпей — ильменита, циркона, тантало-ниобатов и др. По данным С.И. Гурвича [38], пространственно-генетическая связь оловянных и редкометалльных россыпей с разновозрастными корами выветривания устанавливается совершенно однозначно. При эрозионно-денудационной переработке коренных источников, затронутых корой выветривания площадного типа, могут быть различные варианты соотношений эрозионно-денудационных врезов и продуктивных толщ.

Если врез гидросети имеет характер обычных эрозионных долин, то в этом случае процесс россыпеобразования будет происходить по обычной схеме флювиального концентрирования. При этом будут образованы многочисленные аллювиальные, ложковые и склоновые россыпи в тесной пространственной близости от коренных источников. Однако такой вариант возможен при достаточно выраженных антимиграционных свойствах россыпеобразующего минерала. Такими свойствами обладают самородная платина, касситерит, вольфрамит и некоторые другие минералы. Если же россыпеобразующие минералы склонны по своей гидравлической крупности к подвижности в водно-аллювиальной среде, то концентрация таких минералов в аллювии будет затруднена. Отмечается, в частности [21], что такие минералы не концентрируются у плотика и что для их накопления более благоприятно

тен аллювий равнинных рек. В аллювии же горного типа нередко происходит разубоживание содержаний полезного компонента по сравнению с содержанием в коре выветривания.

Б.И. Прокопчук [121] считает, что при размыве единичного тела кимберлитов образуется россыпь небольшой протяженности (1–2 км). Содержание алмазов очень быстро разубоживается: даже около богатых трубок на расстояниях 2–4 км содержания алмазов в аллювии рек уменьшаются более чем в 10 раз по сравнению с участками, примыкающими непосредственно к трубкам. В аллювии алмазы распространены по всей мощности с некоторым возрастанием в нижней приплотиковой части. Таким образом, при локальном эрозионном врезе в кору выветривания или коренной источник площадного типа общие запасы ценных минералов в аллювии пропорциональны объему вреза (т.е. переработанного рекой продуктивного материала) и обратно пропорциональны процессам выноса россыпеобразующих минералов. Если врезающийся водоток имеет значительные уклоны, а кора выветривания хорошо проработана, то россыпеобразование в речной долине будет крайне затруднено, так как вынос ценных минералов будет резко преобладать над накоплением вследствие невозможности проявления миграционно-диффузионной концентрации.

Гораздо более благоприятные условия для формирования богатых россыпей за счет размыва коры выветривания создаются при перемыке выветрелых горизонтов коренных источников реками низкой кинетичности. Иногда россыпи в пределах коренных источников площадного типа локализованы в заливообразных депрессиях, долинах крупных рек, дельтовых зонах. В качестве типичного примера таких россыпей можно назвать охарактеризованную В.С. Трофимовым [168] алмазную россыпь р. Вааль со средним уклоном долины 0,001, с широким и плоским дном и относительным врезом 110–130 м в приустьевой части и 10–15 м в истоках.

Анализируя особенности строения и условия залегания россыпных месторождений, образовавшихся за счет различных россыпеобразующих формаций и размещающихся в пределах продуктивных структур, которые переживают различные стадии тектоно-геоморфологической эволюции, мы пришли к выводу о том, что роль кор выветривания для образования разных минеральных типов россыпей трактуется по меньшей мере недостаточно корректно. Подобно тому, как выше была показана невозможность объяснения процессов выветривания рудного вещества разного состава на основе одной общей схемы выветривания, также невозможна трактовка роли кор выветривания без строгой дифференциации процессов корообразования по отношению к типам коренного источника, а также к типам неотектонических движений, вызывающих эрозионно-денудационное расчленение поверхностей выравнивания и кор выветривания. Взяв за основу традиционную схему Ю.А. Билибина о наиболее благоприятных условиях для россыпеобразования при размыве кор выветривания, мы последовательно проверяли эту схему на примере эрозионного расчленения зон гипергенного изменения рудных тел различной формационной принадлежности. Такой анализ показал прежде всего, что

мощность зоны гипергенно-измененных пород или коры выветривания сама по себе не определяет богатство формирующихся россыпных месторождений. Эта мощность не определяет и величины вреза гидросети. Кроме того, кора выветривания в пределах существенно кварцевых рудных тел не обеспечивает и достаточно полного разрушения кварцевого материала. Совершенно убедительные доказательства благоприятной роли кор выветривания для процессов россыпеобразования устанавливаются только для коренных источников с невысокими первичными содержаниями ценных минералов. В этом случае в коре выветривания происходит первоначальное обогащение россыпеобразующими минералами в 1,5–2 раза. Если после этого кора выветривания подвергнется переработке эрозионно-денудационными процессами в условиях невысокой гидродинамической активности (крупные реки, мелководные прибрежно-морские условия), то могут возникнуть относительно крупные по размерам и запасам россыпи. Если же темп неотектонических движений вызовет интенсивное эрозионное расчленение пенеплена и кор выветривания, то в этом случае в речных долинах смогут сохраниться только те россыпеобразующие минералы, которые способны противостоять высококинетичному режиму горных потоков.

Такова принципиальная схема, которая отчетливо вырисовывается при анализе вопроса о роли кор выветривания. Эта схема снова подводит нас к извечным вопросам геологии россыпей о соотношении климата и тектонического режима, климата и продуктивности эпох россыпеобразования, тектоники и продуктивности россыпеобразования и т.д. В целях комплексного анализа этих вопросов целесообразно взглянуть еще на одну грань литогенетических проблем россыпеобразования. Это факторы эрозии и денудации в процессах континентального литогенеза, связь эрозионно-денудационных процессов и темпов их проявления с климатом и тектоникой.

Отношение этих факторов к проблемам россыпеобразования состоит в том, что эрозионно-денудационные процессы проявляются в целом совершенно независимо от наличия или отсутствия на их водосборных площадях кор выветривания. Следовательно, совершенно правомерной является постановка вопроса о возможности россыпеобразования без участия стадии корообразования, а просто за счет совершенно обычной флювиальной деятельности водных потоков. Постановка такого вопроса до настоящего времени была затуманена противоборством двух концепций, упоминавшихся выше: концепции о преобладании химического выветривания как главного условия наиболее мощных проявлений россыпеобразования и альтернативной трактовки – благоприятного развития россыпеобразования в перигляциальных обстановках с отчетливой выраженностью физического выветривания. Очевидно, что эти концепции отражают полярно противоположные, как бы экстремальные варианты россыпеобразования, даже пространственно резко разобщенные в современной физико-географической среде.

Эрозионно-денудационный процесс оказался забытым в борьбе двух упомянутых концепций, хотя именно этот процесс является глав-

ным инструментом создания речных долин и аллювиальных отложений со всем комплексом минеральных ассоциаций в аллювиальных горизонтах. Эрозионно-денудационный процесс хотя и несет на себе признаки литогенетической зональности, однако проявлен на поверхности всей нашей планеты, полностью определяется энергетическим состоянием каждого данного участка земной поверхности и совершенно не зависит от дискуссий о преобладании физического или химического выветривания. Иначе говоря, анализ проблемы россыпеобразования в целом приводит к выводу, что формирование россыпных проявлений может быть результатом, как писал Ю.А. Билибин, совершенно обычной деятельности водных потоков. Таким образом, концепции о преобладающей роли физического или химического выветривания и соответственно этому о предпочтительности для россыпеобразования холодного или жаркого климата необходимо дополнить представлением о независимости в определенных случаях процессов формирования россыпей от типа климата и об обусловленности его в этих случаях обычными эрозионными процессами. Однако для решения вопроса о правомерности такого подхода к проблеме россыпеобразования необходимо рассмотреть соотношение механической и химической денудации в процессах континентального литогенеза.

#### О механической и химической денудации в связи с проблемой россыпеобразования

Анализирувавшаяся выше противоречивость представлений о соотношении физического и химического выветривания отразилась в теории континентального литогенеза в виде вопроса о механической и химической денудации. Очевидно, что понятия о выветривании и денудации не вполне адекватны. Однако логично предположить, что структура продуктов выветривания должна быть в общих чертах подобна структуре выносимого реками материала в виде механического и ионного стока.

Такого рода закономерность рассматривалась Н.М. Страховым как весьма важный критерий направленности литогенетического процесса, отражающий взаимодействие тектонических и литогенетических факторов. Он отмечал, что механической денудации на территории гумидных климатов присуща ясно выраженная зональность [159]. Этот вывод Н.М. Страхова не совсем согласуется со сложившимися представлениями о преобладании химического выветривания между изотермами  $+10^{\circ}\text{C}$ , т.е. в зоне тропического влажного климата. Подчеркивая, что эта закономерность представляет большой принципиальный интерес, Н.М. Страхов считает главной причиной усиления механической денудации температурный режим указанной зоны. Действие его объясняется тем, что он ускоряет процессы механического и химического выветривания пород на водосборных площадях. Количество же метеорных осадков действует как денудирующий фактор. Поскольку температура и количество осадков резко возрастают при переходе от умеренной полосы влажных климатов к тропической, это вызывает соответствующую зональную локализацию на поверхности Земли интенсивной механической денудации [159].

Однако мы находим у Н.М. Страхова формулировки, которые создают противоречивое представление по рассматриваемому вопросу. Он неоднократно подчеркивает, в частности, что специфической особенностью гумидных зон является сильное развитие химического выветривания, которое обычно оттесняет процессы чисто физического разрушения пород, а с другой стороны, утверждает, что с усилением механической денудации усиливается и химическая, и наоборот [159].

Несмотря на некоторую незавершенность разработанных Н.М. Страховым представлений о соотношении механической и химической денудаций, эти представления имеют фундаментальное значение для понимания литогенетической сущности эрозионно-денудационных процессов и развивающихся синхронно с этими процессами явлений концентрации или рассеяния россыпеобразующих минералов.

Н.М. Страхов показал, что изменения интенсивности механической и химической денудации континентов, будучи одинаково направленными, происходят значительно различными темпами. Так, механическая денудация варьирует от 3,9 до 2000 т/км<sup>2</sup>, т.е. темп возрастает в 500 раз, а химическая – от 3,9 до 290 т/км<sup>2</sup>, т.е. всего в 70 раз [159, с. 23]. Интерпретируя эту закономерность, исследователь делает вывод, что изменения напряженности механической денудации при переходе от гор к низинам или от областей сильно увлажняемых к областям с малыми атмосферными осадками многократно сильнее соответствующих изменений денудации химической. Большой размах изменений механической денудации, чем денудации химической, вызван тем, поясняет Н.М. Страхов, что процессы механического смыва просты и в единицу времени протекают гораздо быстрее, легче, чем процессы химического выноса. При механическом смыве вода является непосредственной и прямой движущей силой процесса, при химической же денудации выносу растворенных соединений предшествует растворение твердых фаз.

На основании найденных соотношений Н.М. Страхов опровергает существовавшие представления, согласно которым эпохи усиления механического смыва, например, в процессе или после горообразования считались эпохами подавления денудации химической, а эпохи пенеппенизации, наоборот, – как эпохи большой абсолютной интенсивности химического смыва при малой механической денудации. Действительные соотношения между химическим и механическим смывом, по мнению Н.М. Страхова, были совсем иными. В эпохи после горообразования абсолютно усиливалась не только денудация механическая, но и денудация химическая, однако рост первой опережал рост второй, почему и получалось относительное преобладание механической денудации над химической [159 с. 23]. Хотя выводы Н.М. Страхова сформулированы по вполне понятным причинам в довольно общей форме, они содержат необходимую основу для кардинального пересмотра представлений геологии россыпей о соотношении физического и химического выветривания и их роли в фор-

14. Зак. 757

мировании россышных концентраций. Из выводов Н.М. Страхова с необходимой правомерностью вытекает несколько следствий, хорошо согласующихся со всем изложенным нами выше материалом.

Первым из этих следствий является констатация единства физико-химического процесса выветривания, отражаемого в виде сопряженности механической и химической денудации. Даже в зоне тропического влажного климата механическая денудация может резко преобладать над химической. Это происходит, во-первых, потому, что, как мы видели из экспериментальных данных, химическое выветривание влечет за собой интенсивную диспергацию материала, который присоединяется к механической денудации, повышая долю дисперсного материала в выносе рек. Во-вторых, при горообразовательных движениях резко возрастает энергия водных потоков, которые производят гидромеханическое дробление и продуцирование огромных масс дисперсного материала. Вторым важным следствием из выводов Н.М. Страхова является необходимость признания интенсивного развития эрозионно-денудационных процессов без формирования коры выветривания. С.С. Смирнов на примере сульфидных месторождений показал, что энергичное развитие эрозионных процессов всегда опережает формирование зоны окисления. В литогенетической трактовке Н.М. Страхова этот факт означает, что в горных районах механическая денудация может резко преобладать над химической. Следовательно, физическая составляющая выветривания становится преобладающей не только в условиях холодного климата, как это принято считать, но и в условиях тропического влажного климата. Разница состоит лишь в том, что физическое выветривание как бы приобретает иной облик; криогенное уступает гидромеханическому, термодислокации в области низких температур сменяются термодислокациями при более высоких температурах, и т.д. Наконец, третьим важным следствием выводов Н.М. Страхова, особенно для решения проблем россыпеобразования, является очевидная обусловленность интенсивности эрозионно-денудационных процессов энергией, которая может быть реализована в каждой данной точке земной поверхности для приведения данной литогенетической системы в равновесное состояние с эквипотенциальной поверхностью геоида. Последнее заключение подводит необходимую энергетическую основу под все выводы Н.М. Страхова, о которой он прямо не говорит, но явно подразумевает под своими оценками интенсивности механической и химической денудации. Действительно, анализируя все многообразие тектоно-геоморфологических и климатических факторов и типов литогенеза, мы не можем найти никакого другого понятия, кроме понятия энергии, которое пронизывало бы с такой очевидностью все наши представления об экзогенных геологических процессах и создавало необходимую физическую основу для их развития.

В свете развиваемых представлений становится ясно, что вопрос о соотношении физического и химического выветривания — это не частная проблема довольно узкой прикладной науки — геологии россыпей, а фундаментальная научная проблема для всего цикла геоло-

210

гических наук, изучающих процессы на поверхности Земли. В плане же задач россыпной геологии мы можем уверенно констатировать, что, как и в вопросе о выветривании, в литогенетическом процессе в целом первичными являются факторы физической деструкции горных пород, механического переноса терригенного материала и осадения в конечных водоемах стока. Факторы химического воздействия накладываются на физические процессы с той или иной степенью интенсивности, регулируемой физико-географической средой и вещественным составом первичных руд или горных пород. Следовательно, химические процессы, в максимальной степени зависящие от температуры среды, уровня солнечной радиации, количества влаги, являются в наибольшей степени подверженными зональной изменчивости этих факторов. Физические процессы литогенеза по сути своей азональны, так как являются энергетически наименее емкими, но, как показал Н.М. Страхов, они также активизируются, попадая в своеобразный резонанс с химическими процессами в пределах влажной тропической зоны.

Известно [200], что наиболее существенной чертой в тектоно-геоморфологической эволюции металлогенетических зон и заключенных в них россыпеобразующих формаций является чередование фаз тектонического покоя с развитием поверхностей выравнивания, с фазами тектонической активизации и эрозионно-денудационного расчленения металлоносных структур [200]. Однако процесс переработки рельефа и коренных источников только косвенно связан с климатом, в той степени, в какой климат способен интенсифицировать химические процессы выветривания. Главная же тенденция изменения поверхности в любом климате — это тенденция восстановления равновесия, нарушенного тектоническими процессами. Эта тенденция реализуется через вынос масс терригенного материала из областей мобилизации, причем реализуется вне зависимости от климатической обстановки. Следовательно, главное условие россыпеобразования (наряду с наличием коренного источника) — деструкция коренного месторождения — реализуется вне зависимости от климата. Сам же факт образования или отсутствия россыпей реализуется на уровне гранулометрической и минералогической дифференциации терригенного материала, процессы которой находятся под влиянием климатической зональности в одних случаях или являются азональными — в других. Наличие такой сложной иерархии факторов, стадий и процессов формирования россыпных месторождений заставляет нас рассматривать эти процессы идущими одновременно на различных литогенетических и энергетических уровнях. Наряду с очевидной неполнотой и фрагментарностью рассмотрения процессов россыпеобразования на том или ином уровне избранный подход позволяют увидеть внутреннее единство всей пространственно-генетической схемы россыпеобразования. Одним из важнейших звеньев такой схемы является эволюция терригенного материала.

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКАЯ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ  
ТЕРРИГЕННОГО МАТЕРИАЛА  
В СВЯЗИ С ПРОЦЕССАМИ РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЯ

К вопросу об эволюции терригенного материала мы подходили в данной работе последовательно во всех предыдущих разделах. Выше рассмотрены физические и химические процессы диспергации горных пород и руд при их выветривании, гидромеханическом дроблении и других воздействиях. Кроме того, рассмотрены такие аспекты выветривания, которые удобно анализировать с позиций теории прочности и физики разрушения. Рассмотрены также явления диспергации материала на примере природных процессов и на основе их лабораторного моделирования. Наконец, кратко рассмотрена энергетическая сторона литогенетического процесса. Анализируя вопрос об эволюции терригенного материала во всех многочисленных его аспектах, мы сочли необходимым придерживаться и в этом вопросе стержневой линии нашего исследования: раскрытие физико-химической сущности процессов россыпеобразования на фоне континентального литогенеза. Главным же движущим фактором физико-химических и литогенетических процессов является энергетический фактор. Именно поэтому вопрос об эволюции континентальных осадков мы рассмотрим сквозь призму энергетической обусловленности этой эволюции.

Главной тенденцией эволюции терригенного материала на поверхности суши является стремление к измельчению, ко все большей и большей диспергации, вплоть до коллоидного и молекулярного состояния. Этот кажущийся самоочевидным закон не получил еще в геологии, насколько известно автору, надлежащей интерпретации, особенно в отношении его физического содержания. Между тем признание и объяснение закона облегчили бы понимание сущности литогенетического процесса в целом и россыпеобразования в частности. Прежде всего необходимо отметить, что прогрессирующая диспергация горных пород и руд на поверхности Земли в ходе разнообразных морфолитогенетических процессов не является самопроизвольной. Как и всякий процесс распада одних частиц на другие, меньшего размера, диспергация сопровождается поглощением энергии, или, иначе говоря, требует затрат энергии. Причем, чем выше степень диспергации, тем большая энергия требуется для этого.

Сама по себе констатация этого явления природы, для удобства называемого в дальнейшем законом диспергации, правда, констатация в отвлеченно-абстрактной форме, далеко не нова. А.А. Сауков отмечал, что измельченное вещество горных пород поверхности Земли — глины, пески, илы и т.д. — является своего рода аккумулятором солнечной энергии, которая в результате геологических процессов переносится в глубины Земли и высвобождается при последующих процессах перекристаллизации, когда происходит укрупнение частиц [139, с. 230]. В.И. Лебедев и Н.В. Белов еще раньше указали на то, что при выветривании полевых шпатов они превращаются в каолин и другие минералы глин. При этом происходит перестройка

кристаллической структуры исходного минерала, в процессе которой расстояние между ионами алюминия и кислорода увеличивается примерно на 12%. На то, чтобы раздвинуть ионы в поверхностных условиях, затрачивается энергия солнечных лучей, которая как бы аккумулируется в кристаллической решетке новообразованных минералов.

На основании экспериментов, в которых сущность энергетической обусловленности литогенеза впервые предстала для нас в наиболее наглядной форме, и анализа широтно-климатической изменчивости элювия, а также опираясь на охарактеризованные выше представления Б.Б. Польнова, А.Е. Ферсмана, Н.М. Страхова и других исследователей, закон диспергации можно выразить в принципиальном виде соотношением, связывающим размер  $D$  частиц минерального вещества, получающихся при диспергации массы  $M$  в результате приложения энергии  $E$  в течение времени  $T$ :

$$D_M \sim \frac{M}{E \cdot T}. \quad (20)$$

Нетрудно заметить, что это соотношение близко по смыслу с полученной ранее зависимостью (5) между измельчением материала и расходуемой на это энергией. Сущность соотношения (20) в том, что любой объем (масса) горной породы или руды на земной поверхности испытывает стремление перейти в более дисперсное состояние, а степень реализации этой тенденции, т.е. степень дисперсности, пропорциональна количеству приложенных к этому объему (массе) энергии и времени. Действие закона диспергации и представляет главное физико-химическое содержание эволюции обломочного материала на земной поверхности.

Вторым важным свойством поведения терригенного материала в экзогенных условиях является стремление к равновесию с окружающей средой, причем прежде всего — к равновесию в энергетическом смысле. Таковы постулируемые нами положения, использование которых целесообразно для анализа вопроса об эволюции терригенного материала. В соответствии с этими представлениями наиболее удобным способом выражения степени дисперсности обломочного материала являются графики гранулометрического состава. Анализируя гранулометрические спектры самых различных дисперсных материалов, образовавшихся под воздействием небольшого числа факторов, многие исследователи обратили внимание на принципиальную близость распределения частиц по крупности. В целом вопросу о закономерностях распределения частиц при дроблении посвящены специальные исследования [65]. В частности, В.К. Рубцов теоретически и экспериментально показал, что по выходу дисперсного материала продукты быстрого (взрывного) и медленного (при выветривании) разрушения вполне сопоставимы [134]. Г.М. Идлис на основе представления о случайном дроблении квазиоднородных и изотропных тел показал, что распределение осколков космических тел при их взрывах и дроблении носит вполне закономерный вид, сходный, как отметил В.К. Рубцов, с найденными им соотношениями для быстрых и медленных процессов разрушения горных пород.

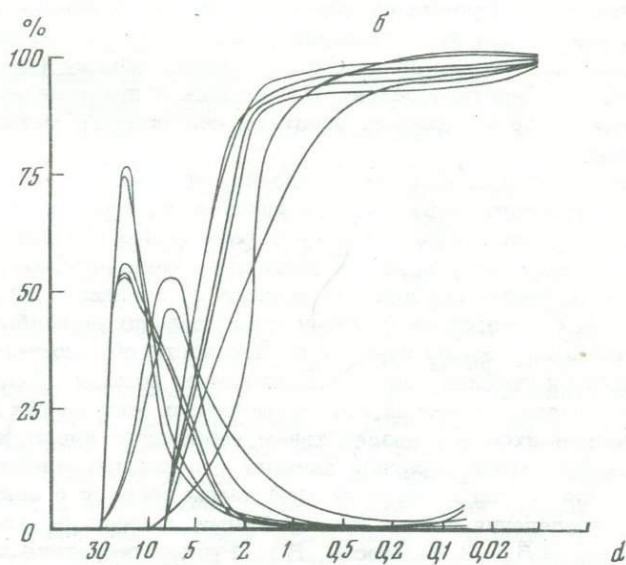
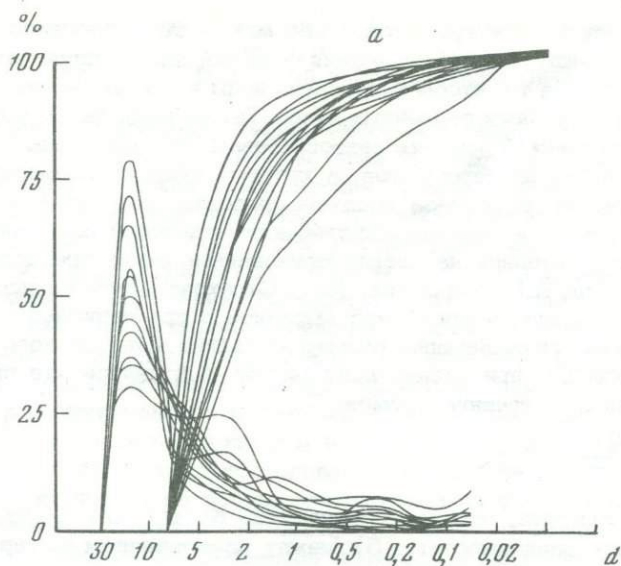
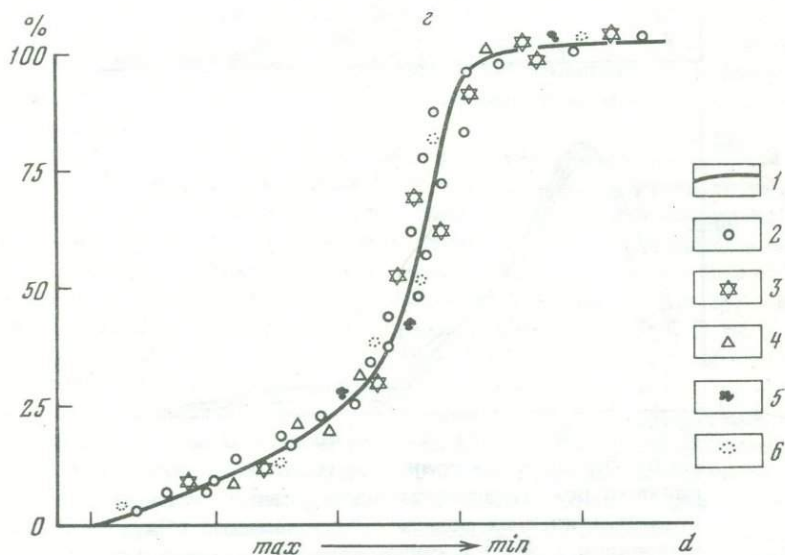
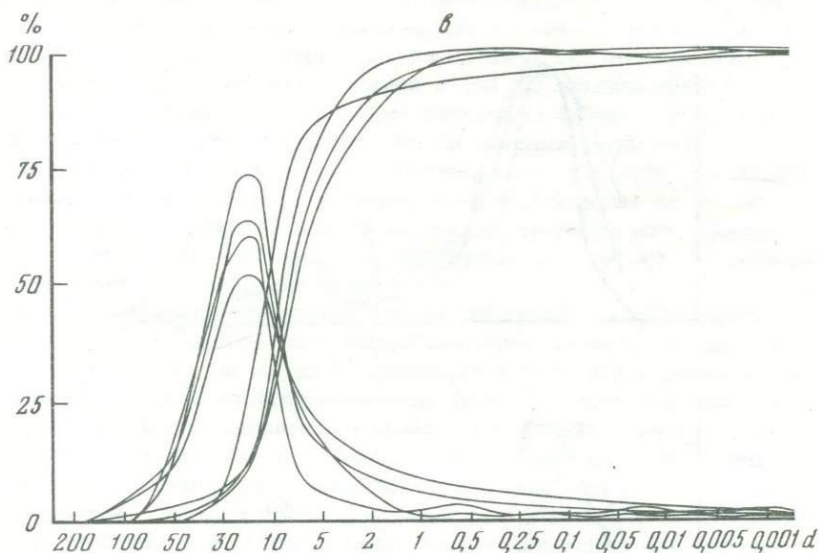


Рис. 57. Гранулометрические спектры дисперсных смесей, образованных при физической деструкции в различных процессах

$S_0$  - коэффициенты сортировки; а - разрушения сжатием ( $S_0 = 2,02$ ); б - разрушение термичес-



кое ( $S_0 = 1,63$ );  $\delta$  - элювий криогенный ( $S_0 = 1,58$ );  $\zeta$  - моногенные дисперсные составы ( $S_0 = 1,5-1,7$ ) (1 - грунт Луны, 2 - золото, 3 - алмазы, 4 - взрывное дробление, 5 - метеоритное дробление, 6 - космическая пыль)

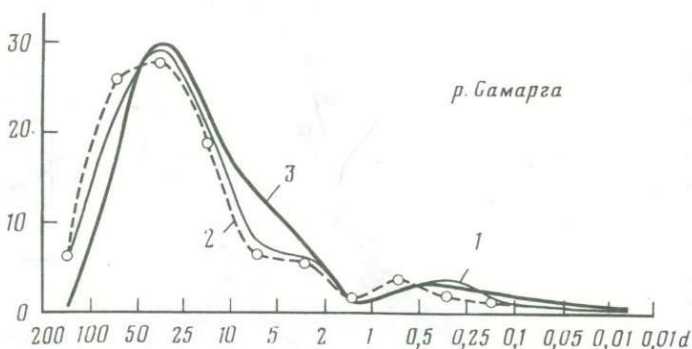
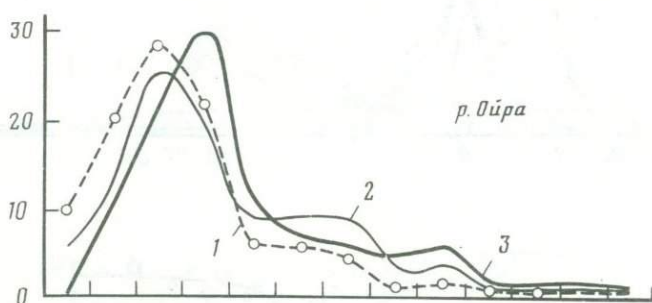
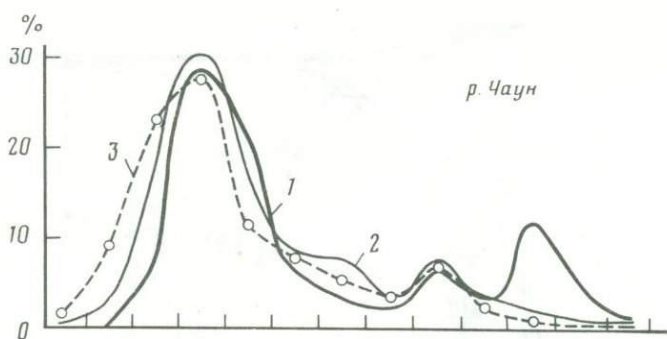
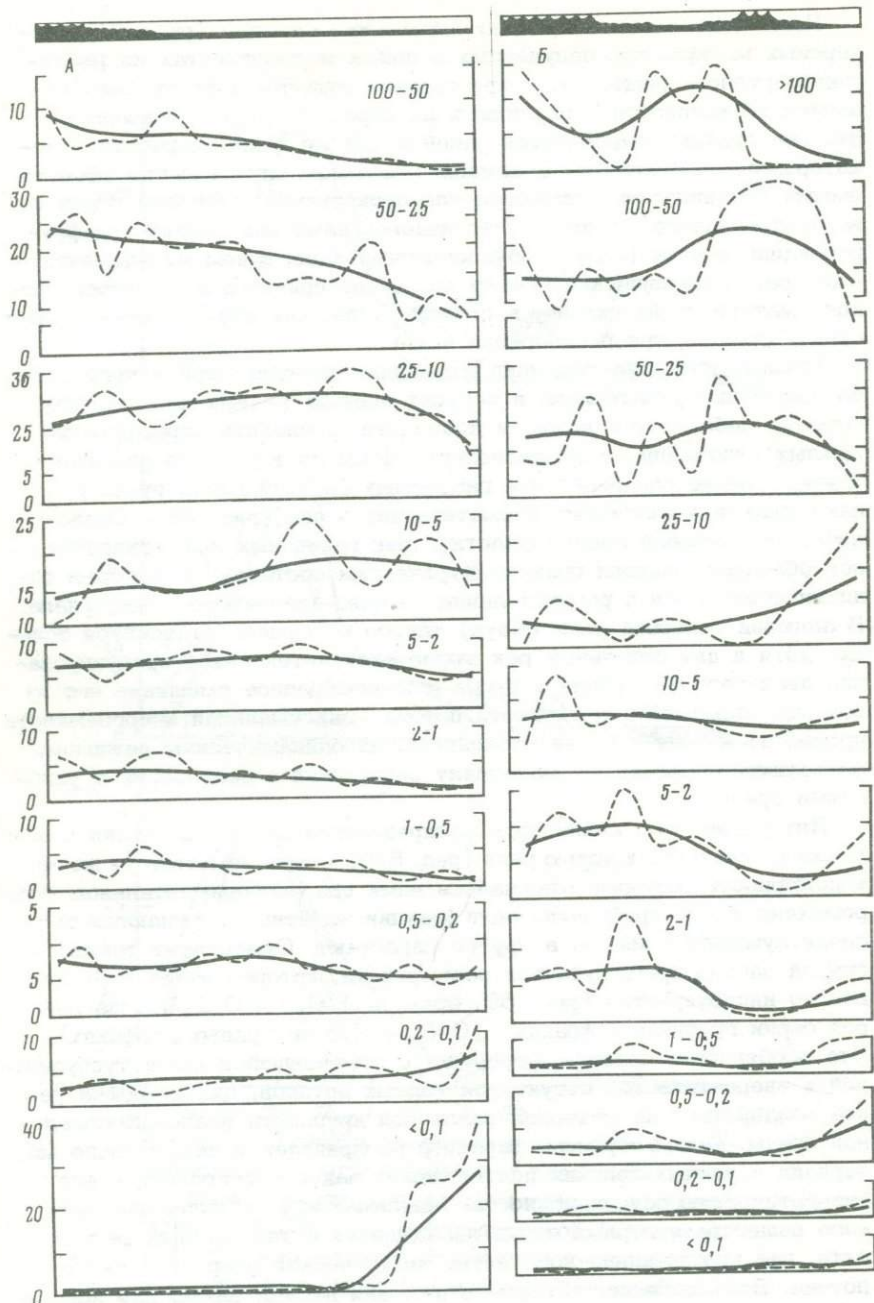


Рис. 58. Графики гранулометрического состава аллювия рек, расположенных в различных широтно-климатических зонах: субарктической (Чаун), умеренной (Ойра) и субтропической (Самарга) р. Чаун: 1 — дельтовый, 2 — равнинно-холмистый, 3 — горный; р. Ойра: 1 — горный, 2 — межгорная впадина, 3 — приморская впадина; р. Самарга; 1 — среднегорный, 2 — альпийский, 3 — приустьевой

Нами сопоставлены гранулометрические спектры (рис. 57) дисперсных материалов, полученных в наших экспериментах по разрушению рудного вещества, с криогенным эловием и распределением частиц по крупности в различных дисперсных средах. Оказалось, что все графики подчиняются одной и той же закономерности с некоторыми отклонениями, в каждом отдельном случае легко объясняемыми особенностями процесса или свойствами материала. Один из вариантов такого отклонения исследован нами как эффект индифференциации осадка [214], обусловленный наложением на элементарный гранулометрический спектр процессов привноса или выноса тонкого материала на склоне, в речном русле, как эффект исчезновения тонких фракций при растворении и т.д.

Помимо изучения динамики изменения гранулометрического состава обломочного материала в верхних звеньях речных систем, что само по себе весьма важно и позволяет проследить формирование рыхлых отложений от эмбриональных форм до типичного аллювия, изучено также распределение размерных фракций вдоль русла рек, находящихся в различных климатических зонах (рис. 58). Оказалось, что аллювий горных участков рек различных климатических зон обладает близким гранулометрическим составом. Некоторые отличия появляются в распределении песчано-алевритового материала. В аллювии северной реки (Чаун) такого материала становится больше, хотя и для остальных рек выявляется интенсивное продуцирование песчаного материала в русле и волнообразное смещение его из зон максимальной кинетичности потока (максимальной энергоемкости процесса) в зону с более спокойным гидродинамическим режимом, позволяющим песчаному материалу находиться в равновесии с условиями среды.

Интересно, что, анализируя распределение различных фракций аллювия от верховий к устью реки (рис. 59), можно заметить те же закономерности, которые отмечались нами при экспериментальном гидромеханическом дроблении: одни фракции заметно сокращаются по своей суммарной массе, а другие нарастают. Существует также группа частиц промежуточной размерности, которая ведет себя довольно индифферентно (рис. 59, фракции 1-0,5 и 0,5-0,2 на левой серии графиков и фракции 10-5, 1-0,5 на правых графиках). Эта особенность связана, вероятно, с отмечавшейся выше турбулентной и энергетической структурой водных потоков, оказывающей разное воздействие на материал различной крупности водно-аллювиальной среды. Таким образом, характер распределения обломочного материала в речных долинах подтверждает закон диспергации и его энергетическую обусловленность. Максимальное измельчение рудного вещества и горных пород наблюдается в тех звеньях речной сети, где максимально количество кинетической энергии водного потока. Эта особенность горного аллювия весьма важна для высвобождения россыпеобразующих и любых других минералов. В равнинных участках рек их энергия уменьшается. При том условии, что дополнительное измельчение поступившего на равнинную часть долины песчаного материала требует повышенных затрат энергии, становится



ся ясно, что на равнинных участках терригенный материал как бы более устойчив, сохраняет постоянство состава на большой протяженности русла.

Это замечание хорошо подтверждается распределением минералов вдоль русла, совмещенным с распределением обломочного материала, и гранулометрических коэффициентов (рис. 60). Поскольку на равнинных участках наступает квазиравновесное состояние между минералогическим составом аллювия, с одной стороны, и гидродинамическим режимом реки — с другой, то, как убедительно показано Б.С. Луневым [83], седиментационная система становится индикатором любых изменений, вызванных внешними факторами. Неотектоническое поднятие, присутствие местного питающего источника, впадение в реку притока немедленно отражаются в гранулометрическом и минералогическом составе аллювия.

Аналогичный приведенному на рис. 60 анализ минералогического и гранулометрического состава аллювия вдоль русел рек Ойра и Самарта также отражает тот факт, что нахождение речной системы в разных климатических условиях не вносит значительных отличий в характер распределения минералов и соотношения, например, групп устойчивых и неустойчивых минералов. К такому же выводу пришел Ю.П. Казанский на основании анализа многочисленных данных по аллювию различных климатических зон. По его мнению, климатический фактор влияет только на характер речной сети, ее масштабы, периодичность разливов, динамику водотоков и т.д. "Материалы по современному континентальному осадконакоплению, — отмечает автор, — не показывают существенных изменений обломочного материала в пределах крупных рек — Днепра, Волги, Миссисипи, пересекающих зоны как влажного, так и сухого климата" [53, с. 69–71].

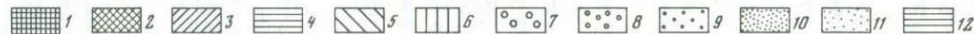
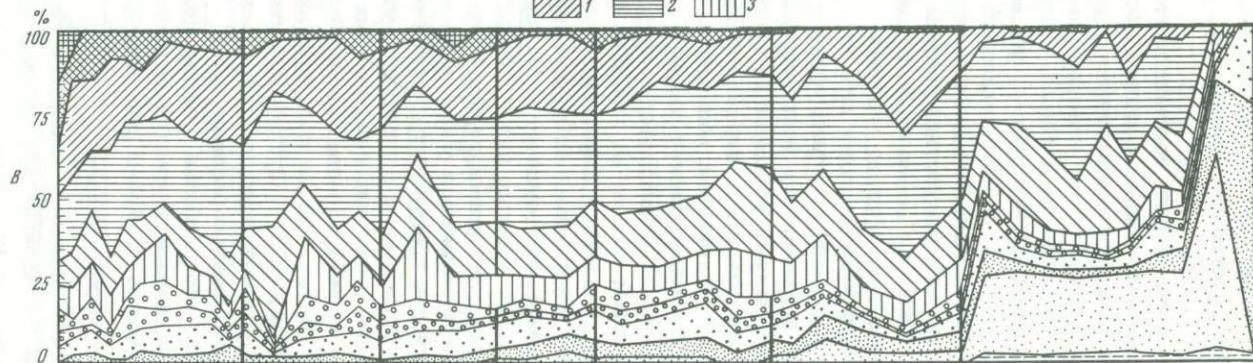
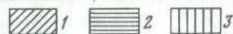
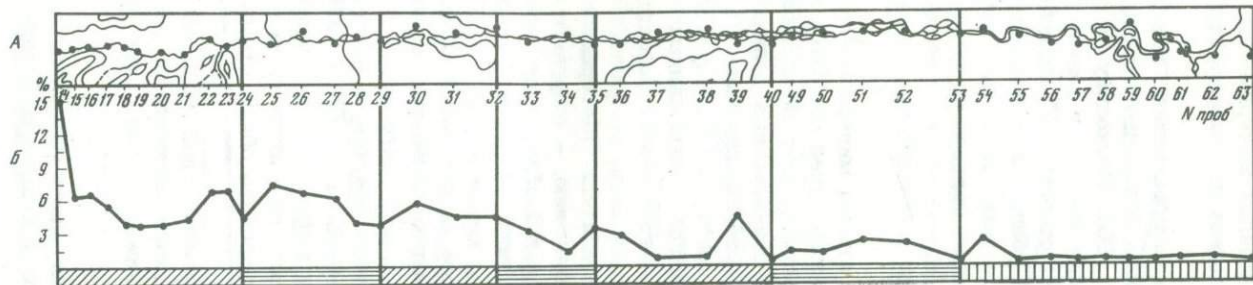
Суммируя сложившиеся у нас в процессе исследований представления о сущности гранулометрической и минералогической эволюции осадка, мы приходим к заключению, что в настоящее время детальность изучения отдельных генетических типов осадков, в частности аллювия, достаточна для понимания внутренних механизмов седиментогенеза. В своем подходе к затронутому вопросу мы стремились отчетливее представить картину континентального литогенеза в ее целостности и соподчиненности отдельных звеньев общей схемы континентального осадкообразования.

Оказалось, что наиболее общей фундаментальной основой для рассмотрения эволюции осадков является закон диспергации. На основе этого закона проблема россыпеобразования теряет свою узкую

---

Рис. 59. Волнообразное смещение терригенного материала в долинах рек в направлении зон седиментации и поведение отдельных фракций в аллювии рек Чаун (А) и Ойра (Б)

1 — зона интенсивно расчлененного горного рельефа; 2 — низкогорье всхолмленное; 3 — предгорная или межгорная равнина; 4 — распределение аллювия после однократного сглаживания кривой гранулометрического анализа; 5 — то же; после повторного сглаживания



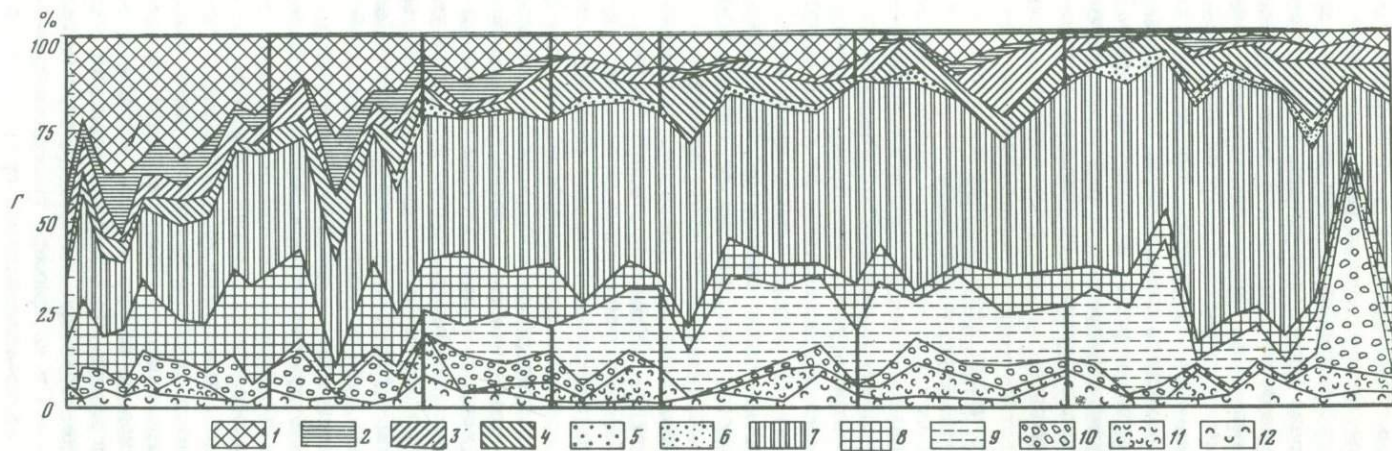


Рис. 60. Литодинамический профиль р. Чаун (бассейн Восточно-Сибирского моря)

А - рельеф изученного участка реки, точки отбора и номера проб аллювия; Б - график уклонов и зоны рельефа: 1 - среднегорный, 2 - равнинный, 3 - изменно-равнинный (прибрежно-морская зона); В - графики распределения размерных фракций аллювия (содержание фракций в вес. %, размер в мм): 1 - (200-100); 2 - (100-50); 3 - (50-25); 4 - (25-10); 5 - (10-5); 6 - (5-2); 7 - (2-1); 8 - (1-0,5); 9 - (0,5-0,25); 10 - (0,25-0,1), 11 - (0,1-0,05), 12 - (<0,05); Г - графики распределения минералов тяжелой фракции: 1 - магнетит; 2 - гематит; 3 - лимонит; 4 - ильменит; 5 - лейкоксен; 6 - гранаты; 7 - пироксен; 8 - амфиболы; 9 - эпидот; 10 - слюды (биотит, хлорит и др.); 11 - обломки пород; 12 - прочие минералы

обусловленность действием климатических факторов. Природные экзогенные процессы во всех климатических зонах постоянно продуцируют все более тонкодисперсный материал, и если крупность данного россыпеобразующего минерала попадает в интервал создаваемого измельчения, то тем самым образуются условия для высвобождения этого минерала из матричного вещества. Однако достигаемый предел измельчения материала зависит от расхода энергии диспергации, которая, в свою очередь, связана с климатом. Кроме того, после высвобождения минералов необходимы определенные литогенетические условия, рассматривавшиеся выше, чтобы их концентрировать. Эти условия также в определенной степени связаны с климатом. В этой связи необходимо коснуться вопроса зональности климата, процессов литогенеза и россыпеобразования.

#### ЗОНАЛЬНОСТЬ ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И РАЗМЕЩЕНИЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В самом начале книги отмечалось, что россыпные месторождения многих минералов не подчиняются климатической зональности (см. рис. 1). Их размещение контролируется планетарными рудными поясами, ориентированными совершенно независимо от современной и палеоклиматической зональности. На первый взгляд такой вывод находится в резком противоречии с точкой зрения многих названных выше исследователей о важной роли климатических факторов в россыпеобразовании. В действительности никакого противоречия нет, если детально разобраться в соподчиненности главных и второстепенных факторов россыпеобразования. Очевидно, что при анализе вопроса о связи россыпеобразования с климатом и климатической зональностью все факторы россыпеобразования можно разделить на зональные и внезональные (азональные, трансзональные). К азональным факторам относятся характер россыпеобразующей формации и тектоника, к зональным — литогенетические условия россыпеобразования. Если подойти к этому вопросу с другой точки зрения, например с позиций энергетики россыпеобразования, то мы также увидим, что эндогенные факторы (изменение гравитационного поля) являются азональными, а экзогенные факторы (лучистая энергия Солнца) — зональными. Если полагать, что энергия внешней среды обеспечивает диспергацию рудного вещества до некоторой заданной крупности, то в россыпеобразовании будут участвовать только те минералы, которые высвобождаются при данной степени диспергации руд. Следовательно, тип диспергации оказывается несущественным для одних минералов и весьма важным для других. Характерным минералом для первого случая является самородное золото. Выше было показано, что криогенное выветривание, гидромеханическое дробление, перетирание рудных обломков на склоне — лишь частные механизмы единого процесса диспергации. Но многие проявления этого процесса явно азональны. Как показано при анализе экспериментального гидромеханического дробления и на примере гранулометрического состава горного аллювия, водно-аллювиальная среда в любой

222

зоне продуцирует большое количество дисперсного материала. Высвобождающееся при этом золото в силу высокой гидравлической крупности легко концентрируется в аллювии водотоков повышенной кинетичности. При этом осуществляется своеобразный кольцевой технологический процесс: чем выше турбулентность (кинетичность, бурность) потока, тем интенсивнее дробление рудного вещества и тем благоприятнее условия для улавливания высвобождающегося золота.

Следовательно, по самой сути своей россыпеобразующий процесс азонален. Он может происходить в любой климатической обстановке, в которой наблюдается диспергация рудного вещества и имеется вода в жидкой фазе для осуществления дифференциации обломочного материала по гидравлической крупности. Многие россыпеобразующие минералы подчиняются принципу азональности, и соответствующие россыпные месторождения следует считать азональными. В разной степени азональны россыпи всех минералов, россыпеобразующие формации которых мы рассматривали выше: золота, олова, платины и алмазов. Однако черты азональности проявляются главным образом при формировании аллювиальных месторождений этих полезных ископаемых. Если же взять элювиальные россыпи, то картина существенно меняется.

Выше мы отмечали, например, что выветривание малосульфидных руд даже в тропическом влажном климате развивается слабо. Поэтому практически неизвестны значительные элювиальные россыпи, образованные за счет коренных источников этой формации. Иное дело, например, россыпи платины. Вследствие невысокой химической устойчивости гипербазитов в элювиальную стадию может происходить заметное обогащение первичных пород платиновыми минералами за счет выноса значительной части матричного вещества. В холодном же климате этот процесс будет выражен значительно слабее и элювиальных россыпей платины ожидать трудно. Аллювиальный процесс при всех своих универсальных способностях формировать россыпи вне связи с климатическими факторами все же не является полностью независимым от этих факторов. Одно из главных ограничений накладывает крупность россыпеобразующих минералов. Если россыпеобразующая формация представлена рудными телами, в которых ценный минерал имеет меньшие размеры, чем те фракции, которые продуцируются водно-аллювиальной средой, то рудное вещество будет рассеиваться в аллювии прежде, чем наступит высвобождение россыпеобразующих минералов. Поэтому для большого перечня минералов оказывается недостаточно простой физической диспергации, которая достигается при физическом выветривании, включая и гидромеханическое дробление. И именно эти минералы и соответствующие им россыпные месторождения обнаруживают отчетливую зональность в своем размещении, хорошо согласующуюся с современной и палеоклиматической зональностью. Это достаточно убедительно показал С.И. Гурвич в своем обстоятельном монографическом исследовании [38].

Итак, если в свете изложенных представлений взглянуть на противостоящие в геологии россыпей концепции о наибольшей благоприятности для формирования россыпных месторождений, с одной стороны, процессов физического выветривания, а с другой — процессов химического выветривания, то мы увидим, что эти концепции не столько опровергают одна другую, сколько дополняют, но в силу определенных причин не объединены единым взглядом, единым подходом к проблеме россыпеобразования. В сущности, многочисленные дискуссии велись вокруг несопоставимых вопросов. Главной же ошибкой являлось игнорирование того, что химическое выветривание — весьма длительный процесс, совершенно несопоставимый с эффективностью диспергации рудного вещества под влиянием физических факторов.

Прежде чем перейти к заключительной главе книги, стоит указать на еще один вывод, относящийся к рассматриваемому вопросу о литогенетической зональности в связи с размещением россыпных месторождений. Поскольку литогенез — это энергетически обусловленный процесс, то темп этого процесса не может превысить того предельного уровня, который задается энергией окружающей среды. В какой степени процессы литогенеза отвечают энергетическому уровню среды, так сказать, каков коэффициент полезного действия литогенетических процессов относительно доступной для этих процессов энергии — это самостоятельный вопрос. Но что касается верхнего уровня энергетической обеспеченности литогенеза, то совершенно ясно, что в единицу геологического времени в каждом пункте земной поверхности может произойти такой объем литогенетических превращений, какой разрешается количеством имеющейся в этом пункте энергии. Из этого очевидного утверждения вытекает важное соотношение: скорости выветривания в разных точках Земли не могут различаться в большее число раз, чем различаются величины энергии, имеющиеся во внешней среде (включая и гравитационную энергию, реализуемую в виде кинетической энергии водных потоков). По-видимому, верно и обратное утверждение: разные количества энергии в разных пунктах могут обеспечить разную степень диспергации горных пород, но не в большее число раз, чем различаются уровни энергии в этих точках. Изложенные соображения представляют, на наш взгляд, интерес в том отношении, что темпы диспергации в условиях холодного климата могут при определенных условиях превышать диспергацию вещества в экстремальных тропических условиях только за счет более эффективного использования суммарной энергии в первом случае, чем во втором. Однако реальная картина энергетической обусловленности процессов континентального литогенеза должна быть выявлена на основе специальных и более обстоятельных исследований.

## ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПОИСКОВ РОССЫПЕЙ

Весь материал книги, предшествующий данной главе, нацелен на то, чтобы несмотря на многочисленные отступления, подойти к вопросу о литогенетических критериях геологической проспекции россыпных месторождений. При всей фрагментарности и во многих отношениях неполноте изложенных выше материалов они позволяют представить широкую панораму мелких и крупных вопросов геологии россыпей, требующих ответа для более целенаправленного ведения исследовательских и производственных работ в этой области. Одним из главных среди этих вопросов является продуктивность различных формаций в отношении россыпеобразования, а также факторы, ее определяющие.

## РОССЫПЕОБРАЗУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАЦИЙ

В связи с характером имевшегося в нашем распоряжении материала не все рассмотренные выше формации могут быть охарактеризованы в данной работе с одинаковой детальностью в отношении их россыпеобразующей роли. За основу взяты наши полевые наблюдения в районах развития формаций золота, в меньшей степени — в районах распространения формаций олова, еще в меньшей — платины и почти исключительно по литературным данным — формаций алмазов (если не считать одного полевого сезона по изучению алмазных россыпей Северного Урала). Более равномерно охвачены все формации экспериментальным моделированием физического и химического выветривания. Взятые в комплексе, эти данные позволяют составить определенное представление об основных особенностях процесса россыпеобразования за счет каждой формации.

## Соотношение интенсивности физического и химического выветривания рудного материала различных формаций

Полученные нами количественные данные о скорости физического и химического выветривания позволяют объективно оценить (разумеется, в пределах достоверности экспериментальных данных) относительные возможности каждой формации для формирования россыпей.

Напомним, что выветривание — это энергоемкий процесс, основным результатом которого является диспергация первичного кристаллического вещества и доведение этого вещества до устойчивого (равновесного) состояния с внешней средой. Темп выветривания в общем случае регулируется количеством энергии, поступающей к выветривающейся рудной системе. В соответствии с законом сохранения энергии, литогенетическим выражением которого является закон диспергации, выветривание подчиняется тенденции перехода вещества в более устойчивое состояние. Эта тенденция разрешается прежде всего через физические нарушения в массиве вещества: раз-

Таблица 43

Эффективность физического и химического выветривания (по продуцированию фракции &lt;1 мм) различных формаций\*

Формация	Количество образуемого дисперсного материала (<1 мм) за 1 год при выветривании, вес. %		Относительная устойчивость формаций при выветривании, %		Отношение эффективности физического выветривания к химическому
	физическом	химическом	физическом	химическом	
Золото-кварцевая мало-сульфидная	0,048	0,002	100	100	24:1
Золото-кварцевая умеренно-сульфидная	0,534	0,028	9	7	19:1
Касситерит-кварцевая	0,078	0,006	62	33	13:1
Касситерит-силикатная	0,180	0,043	29	5	4:1
Касситерит-сульфидная	1,728	0,295	3	0,6	6:1
Дунитовая	0,372	0,156	14	1,2	2:1
Кимберлитовая	2,556	0,384	2	0,6	7:1

\* По экспериментальным данным при следующих условиях: физическое выветривание соответствует  $60 \cdot (\pm T^{\circ}, C)$  циклам в год (примерно район Магадана), химическое выветривание соответствует району Маршалловых островов.

рывы наиболее напряженных связей, зарождение микротрещин, их подрастание, ветвление цепей трещин и постепенный распад массы на множество частиц, каждая из которых обладает уже большей удельной устойчивостью. Такой первичный распад требует минимальных затрат энергии по той причине, что в эту первичную стадию разрушаются наиболее слабые, "созревшие" для разрушения связи. Составляющая химических процессов на этой стадии может быть большей или меньшей в зависимости от внешней среды. Химическое выветривание требует как бы энергии другого сорта. Это - энергия воздействия гидроксильной группы или протона на структуру находящихся под нагрузкой молекул. Воздействие на один из напряженных катионов или анионов приводит к потере части его энергии, и напряженная связь обрывается, давая начало микротрещине (акт физического разрушения) или образованию нового соединения, например окисла железа (акт химического разрушения). Следовательно, энергия химических превращений "работает" на самом тонком, молекулярном уровне. Для развития химического процесса требуется поступление не энергии вообще, а энергии в виде тепла и влаги, которая "усва-

ивается" атомно-молекулярной структурой кристаллического вещества и способствует его переходу в более устойчивое состояние.

Имея в виду эти особенности физико-химического выветривания, очень трудно подобрать удобные критерии для оценки пая физической и химической составляющей в процессе диспергации. Исследования в этом направлении могут быть продолжены, однако для решения вопросов россыпеобразования достаточно воспользоваться сравнением количеств диспергируемого материала в единицу времени при физическом выветривании и при химическом выветривании. Именно так мы поступали при сравнении физического и химического вариантов выветривания оловянных руд (см. табл. 33). Получены данные, показывающие, что химическое выветривание в зависимости от состава руд от 2-3 до 100 раз менее эффективно для продуцирования дисперсной фракции мельче 1 мм по сравнению с физическим выветриванием.

Подсчитанная по аналогичной методике эффективность физического и химического выветривания для различных россыпеобразующих формаций (табл. 43) подтверждает существенно неодинаковую россыпеобразующую способность формаций и преобладание физического выветривания над выветриванием химическим. Оказалось, что наиболее устойчивая к выветриванию рудная масса золото-кварцевой формации и наименее устойчивое матричное вещество кимберлитовой формации при физическом выветривании различаются в 50 раз по способности диспергировать фракцию <1 мм (во всех сравнениях устойчивость золото-кварцевой формации принималась за 100%). В целом различия формаций по устойчивости к физическому выветриванию выражены менее резко. Например, касситерит-силикатная формация при физическом выветривании менее устойчива, чем золото-кварцевая, только в 3 раза, при химическом же выветривании это различие составляет 20 раз. Заметно сглаживаются различия между формациями по мере снижения их общей устойчивости как к физическому, так и к химическому выветриванию. Если у золото-кварцевой формации эффективность физического выветривания в 20 и более раз выше, чем химического, то у касситерит-силикатной, касситерит-сульфидной, дунитовой и кимберлитовой формаций эти различия имеют значения 2-7 раз (см. табл. 43).

Анализируя данные табл. 43, необходимо иметь в виду, что физическое выветривание сопоставляется с условиями Северо-Востока СССР, а химическое - с условиями влажного тропического климата. Если же учесть, что на Северо-Востоке темп химического выветривания замедляется в сотни раз (см. табл. 28), то эффективность физического выветривания станет подавляюще большой по отношению к эффективности химического. Причины различного поведения россыпеобразующих формаций при выветривании достаточно ясны из всего изложенного выше. Это прежде всего вещественный состав матричной массы, вмещающей россыпеобразующие минералы. Определенное значение имеют и различия в первоначальной пористости, но этот показатель в отношении руд и пород как при физическом (см. табл. 16), так и химическом выветривании (табл. 44) изменяется по одному

Таблица 44

Средние значения пористости руд и горных пород в процессе экспериментального химического выветривания

Исследуемый материал	Абсолютная пористость, %	
	до опыта	после 156 ч дренажа раствором уксусной кислоты (рН = 2,5)
Кварц крупнокристаллический малосульфидный	0,25	0,33
Кварц-касситеритовая и касситерит-силикатная руда	0,54	0,69
Гранит светло-серый	0,76	1,01
Гранодиорит	0,46	0,81
Гипербазит	1,37	1,77
Кимберлит	6,28	7,48

закону, поэтому с помощью критерия проницаемости нельзя объяснить разный темп выветривания.

Было бы чрезвычайно интересно оценить соотношение физической и химической составляющей в зависимости от общего прихода энергии, расходуемой на диспергацию рудного вещества. Очевидно, что суммарное действие физических и химических факторов не может превысить предельного значения скорости выветривания, разрешаемой энергетикой данной точки. Не исключено, что эти факторы взаимно пропорционально связаны между собой: снижение химической диспергации должно компенсироваться физическим процессом, и наоборот. Несмотря на известную условность экспериментальных данных, накладываемую параметрами экспериментального процесса, приведенные выше количественные характеристики выветривания позволяют точнее оценить россыпеобразующие особенности каждой формации.

#### Особенности формирования россыпей за счет золото-кварцевой малосульфидной формации

Рудные поля золото-кварцевых малосульфидных месторождений характеризуются на дневной поверхности широким распространением высыпок и развалов рудного и непродуктивного кварца. Участки оруденения представлены обычно положительными формами в рельефе. Следы химического выветривания выражены крайне слабо, в виде ожелезнения сульфидов и слабой желтоватой пигментации вокруг включений сульфидных минералов. Кварцевые обломки обычно остроугольны, выглядят сравнительно плохо окатанными в руслах водотоков, эродирующих рудное поле, и могут разноситься на многие десятки километров от источника. Причем наибольшие расстояния разноса характерны для более прочного безрудного кварца. Вид квар-

цевых высыпок и развалов существенно не меняется при выходе рудных тел в днище долины или при нахождении их в коре химического выветривания. Правда, в последнем случае возрастает интенсивность обохривания, появляются признаки серицитизации, несколько ослабляются межзерновые и межкристаллитные связи и снижается прочность кварца в целом.

Повышенная механическая прочность кварца [132] и химическая устойчивость приводят к тому, что для высвобождения самородного золота из кварцевых руд требуется прежде всего грубое механическое воздействие. Это достигается при гидромеханическом дроблении в водных потоках. Еще более ускоряется процесс дробления, если на него накладывается химическое выветривание. Таким образом, россыпные месторождения за счет золото-кварцевых руд могут формироваться в любой климатической обстановке, обеспечивающей достаточную интенсивность физико-механической диспергации рудного вещества. Химические процессы не препятствуют диспергации, но и не являются обязательным ее условием. Россыпи золота — типичный пример азональных месторождений, образующихся всюду, где только есть достаточное количество рудного первичного вещества. Об этом красноречиво свидетельствует вся история золотодобычи и география районов развития россыпных месторождений золота — от самых высоких широт Земли до тропиков.

Правда, все сказанное относится к аллювиальным россыпям золота. Элювиальные россыпи за счет золото-кварцевой формации развиты слабо. Это опять-таки связано с высокой устойчивостью кварца как к физическому, так и к химическому выветриванию. Однако в определенных случаях, при наличии в рудном материале крупного золота и кварца, характеризующегося друзовидными агрегатами, катаклазированной и т.п., в элювиальных образованиях могут быть встречены промышленные скопления самородного золота, удобные для попутного извлечения при эксплуатации основного месторождения. Типичным примером регионального проявления золото-кварцевой малосульфидной формации и образованных за счет ее россыпей является Северо-Восток СССР. Именно в этом регионе проявились возможности руд этой формации обеспечивать россыпеобразование за счет преимущественно грубодисперсного измельчения первичного рудного вещества частично в элювиально-делювиальную, а главным образом в аллювиальную стадию. Однако физическая диспергация рудного вещества способствует высвобождению только наиболее крупных зерен самородного золота. По мнению В.С. Булгакова, в россыпном месторождении остается 3–5% количества золота, имевшегося в эродированном объеме рудного поля. Л.В. Фирсов находит эту величину равной примерно 4–5%. Формирование кор химического выветривания не увеличивает существенно россыпеобразующей продуктивности золото-кварцевой малосульфидной формации вследствие повышенной устойчивости рудных тел к выветриванию.

Процессы высвобождения частиц золота из существенно кварцевых руд рассматривались Н.А. Шило [196], а позже были изучены более детально [212, 208]. Интересно отметить, что наши пред-

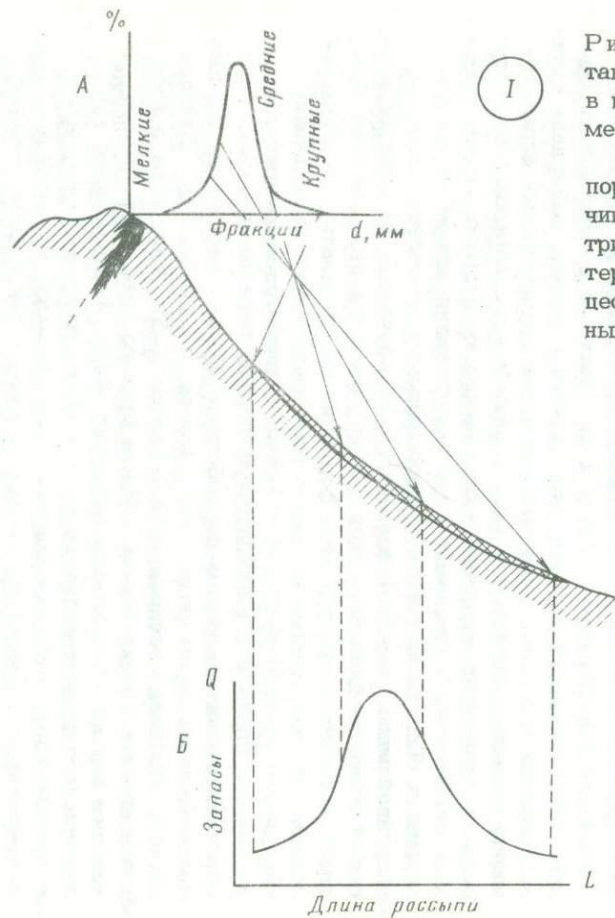
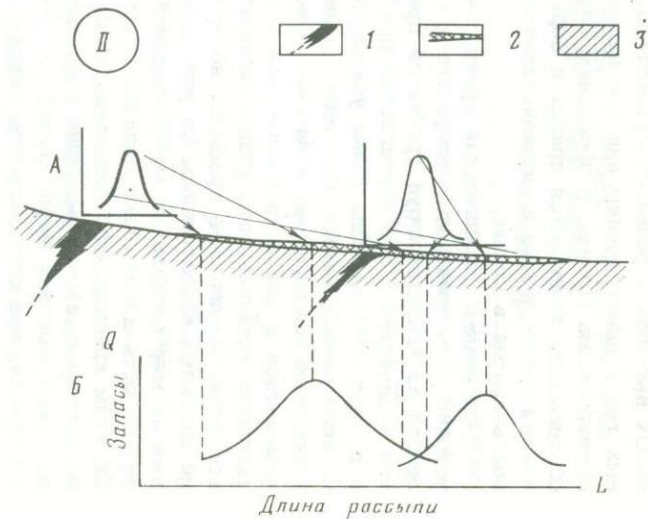


Рис. 61. Характер связи granulометрического состава продуктов разрушения кварцевых жил, заключенных в них россыеобразующих минералов и некоторых параметров формирующихся россыпей

I — жильные тела; 2 — тело россыпи; 3 — вмещающие породы; I — при наличии одного источника; II — при наличии двух (или более) источников; А — кривая granulометрического состава минералов в первичном рудном материале и продуктов его дробления на месте или в процессе транспортировки водным потоком; Б — принципиальный график распределения запасов полезного ископаемого



ставления о характере распределения самородного золота за счет одновременного высвобождения (рис. 61) в русле, основанные на теоретическом анализе вопроса и подтвержденные полевыми наблюдениями на Чукотке [213], нашли полное подтверждение при детальных геологических работах, выполненных В.С. Булгаковым в бассейне Колымы.

### Формирование россыпей за счет золото-кварцевой умеренносульфидной формации

Как было показано выше, устойчивость рудного вещества по мере увеличения его сульфидности заметно снижается. В отношении сульфидных формаций значение химических факторов выветривания резко возрастает. Рудные поля месторождений с повышенной ролью сульфидной минерализации отличаются меньшей крупностью обломочного материала, обломки продуктивного кварца более интенсивно ожелезнены, кавернозны и ноздреваты за счет разрушения менее устойчивых минералов. В рельефе рудные тела этой формации могут быть выражены различными углублениями, небольшими депрессиями и другими отрицательными формами. Причем В.И. Смирнов еще в 1939 г. отмечал, что "надрудные прогибы почвы - очень важный поисковый признак" [150, с. 86]. Возможны также пятна обоживания у выходов рудных тел, геоботанические и иные особенности.

При выветривании умеренно-сульфидных руд интенсивность гипергенных изменений нарастает пропорционально степени сульфидности руд. Поскольку руды сульфидных формаций в целом отличаются более мелким золотом, то для его высвобождения химическое выветривание становится весьма благоприятным фактором. Россыпные месторождения сульфидных формаций также в значительной степени азональны, поскольку для их образования оказываются благоприятными условия как холодного климата, так и умеренного или теплого. Эти россыпи встречаются во всех климатических поясах, но масштабы их меняются. В условиях субарктического климата при недостаточной диспергации рудного вещества иногда за счет коренных источников сульфидных формаций формируются лишь обширные непромышленные ореолы и потоки рассеяния. В этой зоне особо благоприятное влияние на россыпеобразование за счет сульфидных и иных руд золота, неустойчивых к химическому воздействию, могут иметь первичные и переотложенные коры выветривания, что подчеркивается С.Г. Желниным [47]. При этом следует иметь в виду, что коры выветривания, оказывая благоприятное воздействие на высвобождение золота, создают отрицательные условия при размыве коренного месторождения за счет высокой глинистости отложений и ухудшения литогенетических условий концентрации. При анализе линейных кор выветривания по зонам минерализации следует обращать особое внимание на возможное присутствие суффозионно-остаточных россыпей.

## Формирование россыпных месторождений за счет формаций олова, платины и алмазов

Образование россыпей олова, платины и алмазов детально рассмотрено в работах С.И. Гурвича, Н.Г. Патык-Кара, А.П. Сигова, И.С. Рожкова, Г.Ф. Павлова, Б.И. Прокопчука, В.С. Трофимова, Н.А. Шило, Л.В. Разина. Однако полученные нами экспериментальные данные открывают некоторый новый аспект проблемы россыпеобразования, поэтому мы кратко лишь отметим некоторые особенности формирования этих минеральных типов россыпных месторождений.

Руды касситерит-кварцевой формации ведут себя при выветривании и россыпеобразовании, подобно рудам золото-кварцевой малосульфидной формации. Правда, известные коррективы вносит хрупкость россыпеобразующего минерала, поэтому в высокоширотных районах процент остающихся в аллювии запасов олова по отношению к общему запасу в эродированном объеме еще ниже, чем для золото-кварцевой формации. Редки и элювиальные россыпи за счет этой формации. Россыпные месторождения при разрушении руд этого типа могут возникать в любой климатической обстановке, и для них совершенно не обязательно наличие кор выветривания, хотя они и не противопоказаны для россыпеобразования. На основании сравнительных данных по эффективности физического и химического выветривания (см. табл. 43) можно полагать, что химическое выветривание оказывает заметное благоприятное влияние на диспергацию руд данной формации.

Экспериментальные данные показывают, что наиболее благоприятными возможностями для россыпеобразования обладает касситерит-силикатная формация. По сравнению с золото-кварцевой малосульфидной она в 3 раза менее устойчива к физическому выветриванию и в 20 раз — к химическому (см. табл. 43). Следовательно, оптимальные условия для россыпеобразования за счет руд этой формации возникают при наличии химического выветривания. Значительно повышается вероятность формирования элювиальных россыпей за счет руд касситерит-силикатной формации как в холодном, так и в теплом влажном климате, причем в последнем — особенно.

Еще более выражено свойство азонального распределения для россыпных месторождений, формирующихся за счет касситерит-сульфидной формации. При физическом выветривании эти руды в тридцать с лишним раз менее устойчивы, чем золото-кварцевые малосульфидные руды, при химическом — более чем в 100 раз. Поэтому в любой климатической зоне касситерит-сульфидные руды будут легко разрушаться, давая начало россыпным месторождениям. Масштабы россыпеобразования будут зависеть поэтому не от климата, а от богатства коренных источников, кружности касситерита в рудных телах и от конкретных литогенетических условий. Нами осматривались, например, некоторые рудопроявления Чехословакии в районах, совершенно лишенных признаков коры выветривания, но в аллювии которых современного возраста содержались промышленные концентрации касситерита.

Коренные источники платиновых металлов обнаруживают невысокую устойчивость как при физическом, так и химическом выветривании, причем в последнем случае они наименее устойчивы. Нередко гипербазитовые породы настолько изменены выветриванием даже в субарктическом климате, что бывает трудно взять образец совершенно свежих пород. Проследивание вдоль русла поведения обломочного материала, разносимого от массивов основных и ультраосновных пород, показывает, что расстояние их разноса составляет первые несколько километров. Поскольку платиновые минералы не склонны давать столь сосредоточенные скопления, как золото в рудах малосульфидного типа или касситерит, а распределены более рассеянно в телах дунитов, то для всех формаций платины наиболее благоприятны условия предварительного обогащения в корках выветривания. Эта формация более подходит для формирования зональных типов россыпных месторождений. Присутствие довольно значительных элювиальных россыпей минералов платины отмечает П. Вагнер в Южной Африке, в то время как в зонах с преобладанием физического выветривания элювиальные россыпи могут возникнуть лишь в пределах особо обогащенных рудных тел с крупными выделениями минералов платины. В то же время следует подчеркнуть наличие принципиальной возможности формирования концентраций платиновых минералов в аллювии высокоширотных районов даже за счет рудных тел с рассеянной минерализацией и минуя стадию обогащения в корках выветривания. Это связано с тем, что минералы платины обладают более высокой, чем золото, гидравлической крупностью. Поэтому они легко улавливаются и фиксируются в самых верхних звеньях речной сети. Этому способствует и невысокая устойчивость гипербазитов, легко разрушающихся в речном русле при совокупном действии криогенного и гидромеханического дробления. В то же время минералы платины отличаются повышенной стойкостью к истиранию, что позволяет им выдерживать корразионное воздействие переносимого транзитного аллювия и многократные переотложения с одного эрозионного уровня на другой.

Кимберлитовая формация как первоисточник для образования россыпных месторождений отличается особенно невысокой сопротивляемостью к процессам выветривания. Поэтому россыпи, образующиеся за счет этой формации, в значительной степени аazonальные, хотя и испытывают определенное влияние климата, создающего некоторые особенности россыпей каждой климатической зоны. Подробно этот вопрос рассмотрен Б.И. Прокопчуком [121]. По его данным, зональные элювиальные россыпи алмазов, малопродуктивные в холодном климате, но в гумидном климате обогащаемые до 250% по сравнению с невыветрелым кимберлитом (Африка). Наиболее ярко аazonальны россыпи крупных рек, а также мелких рек, содержащих россыпные месторождения в любом климате — от арктического до тропического.

Итак, оценивая россыпнеобразующую роль различных формаций в свете полученных нами экспериментальных данных и изложенных выше теоретических соображений, можно сделать ряд выводов, приме-

Таблица 45

Гранулометрический состав минералов россыпей, образованных за кова, С.И. Гурвича, Г.Ф. Павлова, Н.А. Шило и др.)

Питающая россыпеобразующая формация	Гранулометрические фракции (в мм) и их содержание, вес		
	20-10	10-5	5-2
Золото-кварцевая мало-сульфидная	1,5	17,8	24,2
Золото-кварцевая умеренно-сульфидная	0,3	3,6	4,0
Касситерит-кварцевая	2,0	6,9	10,0
Касситерит-силикатная	-	3,9	7,5
Касситерит-сульфидная	-	-	10,1
Дунитовая	-	-	-
Кимберлитовая	1,0	17,0	47,2
Редкометалльная	-	-	25,0

\* Опубликованные в литературе данные о крупности минералов часто выражены в различных шкалах размерности, в связи с чем усредняемые значения иногда представляют собой интерполированные величины между соседними классами крупности.

нимых к прогнозированию и проспекции россыпных месторождений. Главным и наиболее общим выводом является то, что для всех перечисленных выше минеральных типов россыпей и их россыпеобразующих формаций роль климатического фактора оценивалась излишне тенденциозно, т.е. либо с позиций концепции доминирования химического выветривания для оптимальных условий россыпеобразования, либо с точки зрения альтернативной гипотезы о преобладании физических факторов россыпеобразования. В действительности же коренные месторождения каждой из перечисленных формаций допускают возможность россыпеобразования в любой климатической обстановке, однако разрешенный диапазон максимальной продуктивности может варьировать от состояния полной независимости от климата до отчетливой зональности. Это определяется вещественным составом рудного материала, его структурно-текстурными особенностями и крупностью минеральных выделений. Говоря о последнем факторе, небезынтересно отметить, что условия водно-аллювиальной среды в большинстве случаев являются близкими, обеспечивающими концентрацию россыпеобразующих минералов. Эти условия оказываются оптимальными для формирования шлихового парагенезиса минералов по крупности (табл. 45). Принимая во внимание крупность россыпеобразующих минералов, можно полагать, что климат является как бы скользящим фактором россыпеобразования: чем крупнее минеральные выделения, тем меньше россыпеобразование зависит от климата. При малой крупности рос-

счет различных формаций (по материалам Н.В. Петровской, В.В. Бур-

Гранулометрические фракции (в мм) и их содержание, вес				
2-1	1-0,5	0,5-0,25	< 0,25	Сумма *
16,8	19,4	14,1	6,2	100
5,3	25,1	23,6	38,1	100
15,9	20,3	36,3	8,6	100
17,9	21,8	37,5	9,9	100
26,4	40,5	14,0	9,0	100
46,1	23,0	23,4	7,5	100
27,7	7,1	-	-	100
10,0	30,0	17,0	18,0	100

сыпеобразующих минералов резко повышается необходимость предварительного обогащения рудного источника процессами химического выветривания.

Выводом прикладного значения следует считать возможность обнаружения локальных, но вполне пригодных для промышленного использования россыпных концентраций, образующихся за счет таких формаций, россыпеобразующие способности которых в целом ограничены той или иной климатической обстановкой. Локальные благоприятные условия для образования элювиальных россыпей, например, могут возникнуть и в условиях холодного климата. Еще более возрастает вероятность формирования россыпных проявлений на склоне в связи с дополнительной диспергацией здесь рудного вещества.

Говоря о россыпеобразующем значении характеризуемых выше формаций, не следует забывать, что аналогичная методика анализа россыпеобразующих возможностей применима и ко всем другим, не рассматриваемым в данной работе формациям. Можно указать также на тот факт, что каждая из россыпеобразующих формаций не является мономинеральной. В шлиховом парагенезисе участвует еще целый ряд минералов из числа устойчивых, входящих в матричное вещество, поэтому каждая россыпь является полиминеральным месторождением, из которого во многих случаях целесообразно комплексное извлечение ценных минералов. Решение всех этих задач должно быть делом самых ближайших исследований.

## КРИТЕРИИ ЭРОДИРОВАННОСТИ КОРЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Критерии эродированности коренных источников не служили непосредственной целью нашего исследования. Они рассмотрены автором ранее [213], однако поскольку излагаемые в данной книге результаты вполне подтвердили материалы более ранних исследований, то мы сочли целесообразным изложить их здесь, согласовав с общей направленностью книги. Степень эродированности коренного источника (месторождения, рудного поля, целого рудного узла или отдельных его частей) всегда вызывает острый интерес, так как от этого зависят как продуктивность россыпных месторождений, так и возможные перспективы коренных месторождений. Выше нами подчеркивалось, что кора выветривания под днищами речных долин имеет минимальную мощность, вследствие чего при неотектонической активизации территории река очень быстро прорезает выветрелые горизонты и вступает во взаимодействие с коренными породами днища и заключенными в них рудными телами. Вследствие стимулируемого неотектоникой врезания речной сети в продуктивные структуры в процессе тектоно-геоморфологической эволюции территории продуктивные горизонты коренных месторождений будут эродированы на некоторую глубину, которую предлагается называть мощностью продуктивного вреза —  $M$  (рис. 62). По мере развития глубинной и регрессивной эрозии мощность продуктивного вреза будет нарастать, так как увеличивается пространственный разрыв (по вертикали) между нижним окончанием россыпи и ее верхней частью, продолжающей получать россыпеобразующие минералы из эродируемого рудного поля. Мощность продуктивного вреза резко возрастает, если исчислять этот показатель не для единичной россыпи (рис. 63,а), а для серии россыпей, расположенных в разнопорядковых долинах, эродирующих рудное поле (рис. 63,б).

Возникает представление о том, что поднятие структуры, содержащей серию рудных тел, должно сопровождаться наращиванием запасов полезного ископаемого в россыпных месторождениях. Оказалось, что эти величины можно связать функциональной зависимостью. Ю.А. Билибин наметил принципиальную схему соотношения между горизонтами рудных тел и положением в россыпи "порций" золота, поступивших из этих горизонтов [9, с. 164, 460]. Суть схемы в том, что если рудное поле подвергается эрозии, то первыми перейдут в рыхлые отложения (сначала в элювий, а затем в делювий и аллювий) самые верхние горизонты рудных тел. При этом возникает пространственный разрыв между рудным телом (или серией рудных тел) и той точкой, в которой россыпеобразующие минералы уже образуют экзогенную концентрацию, т.е. разрыв между началом собственно россыпи и питающим ее рудным телом. Очевидно, что пространственный разрыв, о котором идет речь, измеряется не только в горизонтальной плоскости, но и по вертикали (см. рис. 63,а). Поскольку россыпь расположена на наклонной поверхности днища долины, то верхнее окончание россыпи всегда будет иметь гипсометрическое превышение над нижним ее участком. Разность абсо-

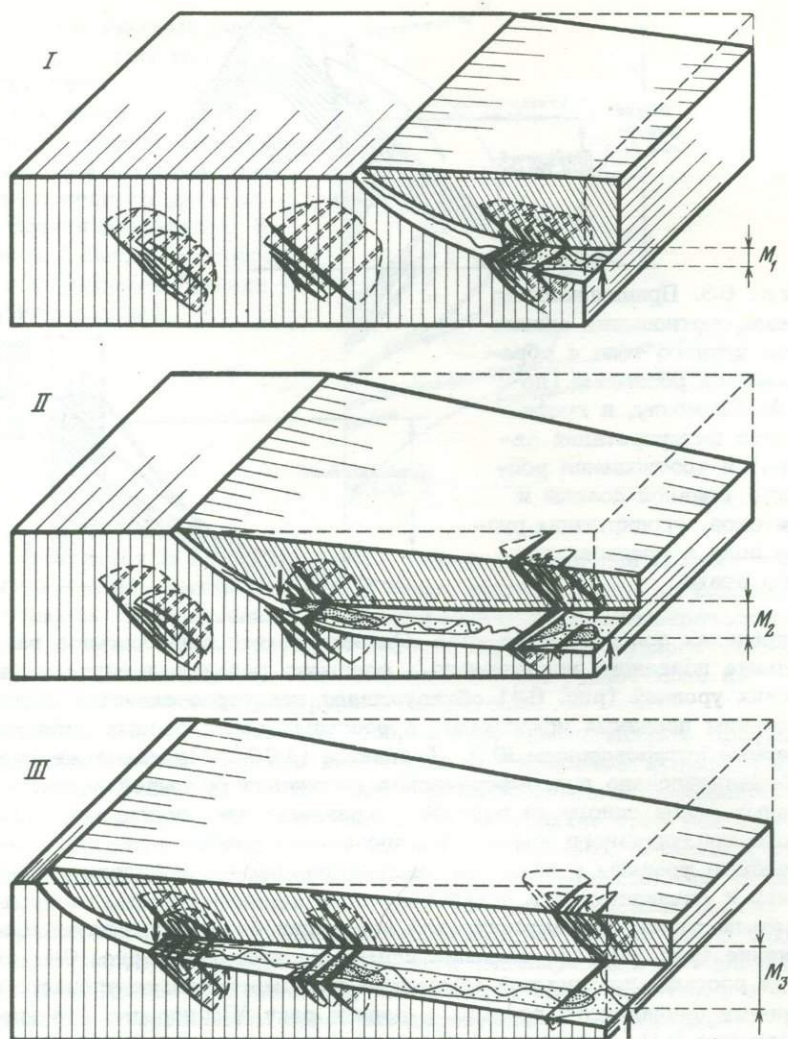


Рис. 62. Схема эрозионно-денудационной переработки блока с серией рудных тел в начальную (I) и последующие (II, III) стадии тектоно-геоморфологической эволюции  $M_1, M_2, M_3$  - увеличение мощности продуктивного вреза по мере развития глубинной и регрессивной эрозии

лютных отметок верхнего и самого нижнего участков россыпи составляет, очевидно, ту часть общего эрозионного вреза, которая и является собственно продуктивной в отношении россыпного полезного ископаемого, например золота. Именно этот высотный интервал, выраженный в метрах, и равен мощности продуктивного вреза.

Взяв за основу этот показатель, можно определить мощность продуктивного вреза не для единичной россыпи, а для серии россыпей

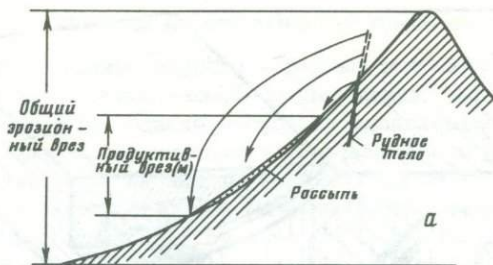
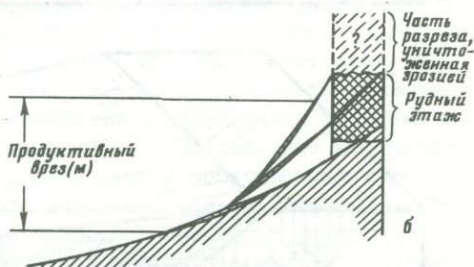


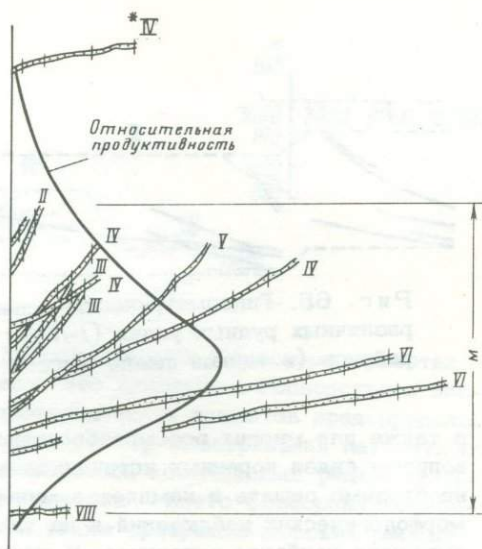
Рис. 63. Принципиальная схема соотношения единичного рудного тела с образующейся россыпью (по Ю.А. Библибину, в графической интерпретации автора) и соотношения россыпей главной долины и притоков, эродирующих рудное поле в пределах рудного этажа



в пределах золотоносного узла. Оказалось, что вертикальное распределение полезного ископаемого в россыпях различных гипсометрических уровней (рис. 64) обнаруживает некоторое сходство с распределением полезных ископаемых в россыпях долин разных порядков, впервые установленным Ю.А. Травинным [166]. По такой же схеме проанализировано гипсометрическое положение россыпей в группе рудных узлов одного из районов. Оказалось, что, используя мощность продуктивного вреза и распределение россыпей по гипсометрическим уровням в качестве индикаторов эродированности рудных полей и анализируя эти показатели по отдельным узлам, удается выявить ритмы неотектонической активации блоков, вмещающих оруденение (рис. 65). В пределах одного из узлов (см. рис. 64) имеются россыпи по меньшей мере пяти гипсометрических уровней: к первому принадлежит россыпь в долине реки VIII порядка (по классификации В.П. Философова), а к пятому уровню – две небольшие россыпи в долинах I и II порядка. На более высоком гипсометрическом уровне встречена еще одна россыпь – в долине IV порядка, залегающая в пределах фрагмента поверхности выравнивания олигоцен-миоценового этапа.

Уже при самом общем рассмотрении гипсометрического положения россыпей в различных узлах отмечается ряд закономерностей. Например, россыпи самого высокого гипсометрического уровня обладают минимальной продуктивностью. Постепенно показатель нарастает в россыпях более низкого гипсометрического уровня. Поскольку известно [174], что водотоки различных гипсометрических уровней и соответствующие им долины разных порядков закладываются согласно с циклами неотектонических движений, то нельзя

Рис. 64. Гипсометрический (высотный) ряд россыпей одного из золото-рудных узлов в долинах разных порядков (II-VIII). Звездочкой помечена россыпь соседнего узла, находящаяся в пределах рельефа, слабее переработанного эрозией (реликт квазипенеплена)



не согласиться с Ю.А. Билибиным, что в россыпи при каждом новом эрозионном цикле поступают новые порции золота из коренных источников. Следовательно, россыпи различного гипсометрического уровня должны иметь золото из разных горизонтов рудного этажа, питавшего россыпи узла, если только, конечно, рудное поле не слишком дислоцировано пострудной тектоникой.

Принимая во внимание эти соображения, можно связать продуктивность россыпей того или иного узла с изменением мощности продуктивного вреза [213]. На основе установленной закономерности могут быть разработаны методы оценки перспектив того или иного района при сопоставлении его с соседними районами. Очевидно, что подобный подход правомерен и ко всем другим минеральным типам россыпных месторождений. Известно, что месторождения многих минералов образуются только в верхних звеньях речной сети. Таковы, например, месторождения россыпной киновари [3]. Наличие россыпных проявлений киновари, несомненно, свидетельствует о незначительном эрозионном срезе месторождения и происходящем современном россыпеобразовании.

Можно констатировать, что узкий гипсометрический спектр россыпей может свидетельствовать как о небольшом эрозионном срезе месторождения, так и весьма большом. В первом случае россыпи будут тяготеть к долинам малых порядков (I, II, III), во втором — к долинам высоких порядков. Надежным критерием эродированности коренного источника является морфология самородного золота. Присутствие слабоокатанного золота в сростках с кварцем свидетельствует о близости коренного источника. Такая же закономерность свойственна и проявлениям самородной платины. О недавнем поступлении золота в россыпи могут свидетельствовать отсутствие высокопробной каемки и другие признаки [40, 41]. Следует ожидать, что сходные критерии будут выявлены и для платиновых металлов,

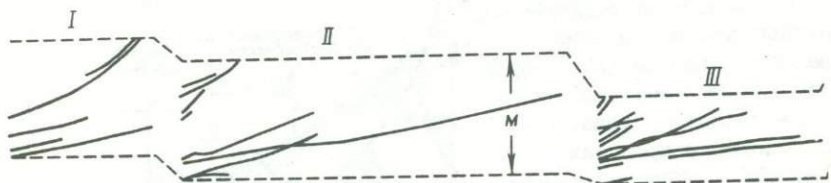


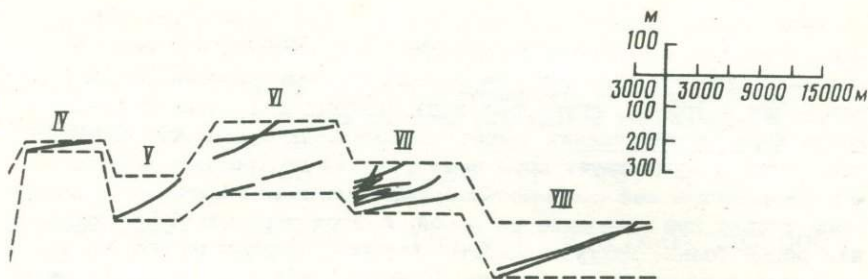
Рис. 65. Гипсометрические спектры (ряды) россыпей в различных рудных узлах (I-VIII) одного из золотоносных районов (в единой шкале высот)

а также для многих россыпеобразующих минералов. Таким образом, вопросы связи коренных источников с россыпными месторождениями необходимо решать в комплексе минералогических и тектоно-геоморфологических наблюдений и на таких примерах, где эта связь выражена наиболее отчетливо. К сожалению, таких целенаправленных наблюдений имеется слишком мало, хотя ясно, что без их проведения поиски коренных месторождений, оценки степени их эродированности лишаются весьма эффективного поискового метода.

#### ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ОБРАЗОВАНИЯ РОССЫПЕЙ И КРИТЕРИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Из всего изложенного выше следует, что единых, универсальных палеогеографических факторов образования всех формационных и минеральных типов россыпей просто не существует. Процесс россыпеобразования является столь же непрерывным геологическим процессом, как и процесс континентального литогенеза, и подчинен тем же тектоно-геоморфологическим факторам. Не менее очевидно и то, что для одних россыпеобразующих минералов важно проявление химического выветривания, а для других климатический фактор не является существенным, а главное значение приобретает эрозионный процесс и непосредственный размыв коренного источника в любой климатической обстановке. Л.Б. Рухин наиболее общим палеогеографическим фактором считал тектонический режим, особенно подчеркивая огромную климатообразующую роль тектонических движений [135]. М.Ф. Веклич, признавая выдающуюся роль климата в россыпеобразовании, в то же время выделяет среди россыпей два разных по происхождению типа месторождений и залежей полезных ископаемых: сформированные за счет неустойчивых в зоне выветривания горных пород и концентрации инертных минералов этих пород в коре выветривания, собственно россыпи и россыпные месторождения [19, с. 18]. Автор отмечает также, что образование россыпей тяжелых минералов происходило в эпохи поднятия суши.

Еще более отчетливо линия на разграничение россыпных месторождений на сильно зависимые от кор выветривания и не связан-



ные с корами выветривания прослеживается в некоторых работах Н.В. Разумихина. Он указывает, что длительное господство в низких широтах тропических и субтропических климатов предопределило широкое площадное развитие мощных кор выветривания латеритного профиля и связанных с их переработкой комплексных редкометалльных россыпей с уникальными запасами - плато Борборена (Бразилия), плато Джос (Нигерия), а также прибрежно-морских россыпей (Австралия, Бразилия, Индия, Индонезия). Во внетропической зоне возможности образования столь крупных комплексных россыпей более ограничены. С другой стороны, россыпи перигляциальной зоны, располагающиеся в верхних звеньях гидрографической сети, характеризуются повышенной крупностью основных россыпеобразующих минералов, которыми здесь являются золото и касситерит [129, с. 26]. Таким образом, даже у исследователей географического профиля, склонных отдавать предпочтение климатическим факторам литогенеза, имеются сомнения относительно возможности все без исключения россыпи связывать с эпохами корообразования и химического выветривания. Однако в этих работах мы еще не видим признания того факта, что между крайними, экстремальными типами литогенеза - перигляциальным и гумидным тропическим - находится зона умеренных климатов, в которых ярко проявлен эрозионный процесс, обуславливающий переувлажнение огромных масс обломочного материала в объеме речного вреза и тем самым снимающий "климатическое veto" на формирование целого ряда минеральных типов россыпей.

В связи с излишней догматизацией концепции о необходимости кор химического выветривания для формирования россыпей золота на Северо-Востоке СССР [47] следует коснуться этого вопроса еще раз.

Линейные коры выветривания признаются С.Г. Желниным весьма важными для россыпеобразования. Он полагает, что начальные этапы формирования аллювиальных россыпей характеризовались развитием мощных линейных кор химического выветривания. Причем из работы С.Г. Желнина ясно, что эта закономерность не только приписывается им россыпям Северо-Востока Азии, но и относится к числу общих закономерностей для всех золотоносных провинций [47, с. 103]. Очевидно, что изложенных в книге С.Г. Желнина данных совершенно недостаточно для обоснования его выводов. Выше было показано, что в общем случае кора выветривания линейно-

го типа служит обычно местом для заложения эрозионных борозд, первичных долин и других фрагментов речного стока. К этим элементам гидросети, как к более низким гипсометрически, бывает приурочен и уровень грунтовых вод. Поэтому под днищами речных долин кора выветривания имеет минимальную мощность. Кроме того, если и существует кора выветривания под речным ложем, то содержащиеся в ней россыпеобразующие минералы перейдут в россыпь только при перемыве их рекой. А этот перемыв будет выполнен рекой только на ту мощность, которая predetermined темпом и амплитудой поднятия территории. С другой стороны, ясно, что река осуществит врезание независимо от того, есть в днище ее долины кора выветривания или нет. Далеко не всегда также удается установить различия истинной зоны гипергенно измененных пород и следов пострудной деятельности остывающих гидротерм. Таким образом, тектонический и эрозионный факторы, особенно в горных районах, являются первичными факторами россыпеобразования наряду с вещественным составом рудного материала. Эти факторы действуют независимо от климатической обстановки, хотя и принимают некоторые специфические формы проявления в зависимости от климата.

Площадные коры выветривания, так же как и линейные, на Северо-Востоке изучены крайне слабо, хотя как показано многими исследователями, действительно играют решающую роль в формировании россыпных месторождений с пониженной крупностью минеральных зерен и невысокими значениями гидравлической крупности минералов. Именно по аналогии с формированием россыпей за счет площадных кор выветривания концепция о химическом выветривании была перенесена на россыпи золота, олова и других минералов, не требующих для своего формирования химического выветривания вследствие более сосредоточенных коренных источников с более крупными минеральными выделениями, и возможностью образования таких россыпей в результате обычной эрозионной деятельности водных потоков. Итак, оценивая палеогеографические условия образования россыпей, необходимо четко дифференцировать процесс россыпеобразования на многочисленные частные модификации этого процесса в зависимости от пересечения таких параметров, как вещественный состав рудного материала (устойчивость матричного вещества и крупность минеральных выделений), скорость эрозионного расчленения, интенсивность энергетического воздействия внешней среды.

В вопросе о физическом и химическом выветривании геолога-россыпника интересует вопрос о том, какой тип выветривания обеспечивает максимальный объем переработки первичных руд в тех или иных конкретных геоморфологических и палеогеографических условиях. Сторонники концепции хомогенной подготовки первичных руд для возникновения россыпных концентраций фактически не рассматривают собственно механизмы и в целом процесс распада рудных тел. За основу берется лишь представление о том, что эпохи планации рельефа обеспечивают максимальный объем гипергенной переработки руд и горных пород. В ряде случаев такой подход как будто

Таблица 46

Скорость диспергации руд разного состава

Характер руд	Число циклов выветривания, необходимое для получения фракции (-1 мм) в количестве, %			
	25	50	75	100
Высококварцевые	92 600	185 000	278 000	370 000
Существенно кварцевые	22 700	45 400	68 200	90 900
Кварцевые	5 500	11 000	16 700	22 200
Малокварцевые	13 900	27 8000	41 700	55 500

бы правомерен. Известны рудные провинции, например Урал, где корообразование предшествовало эрозионно-денудационной переработке зон гипергенно измененных пород и дало начало формированию россыпей платины и золота. Однако научная объективность требует признания, что на том же Урале известны россыпи, сформировавшиеся не за счет размыва коры выветривания, а за счет размыва эрозионными процессами рудных тел. Если бы процессы только физического выветривания и флювиальная деятельность переработали тот же объем горных пород, который заключался в корях химического выветривания, судя по имеющимся данным, экзогенная продуктивность Урала в этом случае не уменьшилась бы. Основанием для этого вывода служат приводившиеся выше данные об эффективности химического и физического выветривания для диспергации рудного материала до песчаной размерности. Например, руды различной степени окварцованности даже без участия гидромеханического дробления распадаются значительно быстрее, чем для этого требовалось бы времени при химической диспергации (табл. 46).

Таким образом, если принять, что для современной физико-географической обстановки число переходов через 0°C на Северо-Востоке и в средних широтах равно в среднем 57 (см. табл. 12), то I-IV типы руд будут разрушены полностью до фракции (-1 мм) соответственно всего за 6500, 1600, 400 и 1000 лет. Разрушение же до содержания фракции -1 мм в количестве 75, 50 и 25 потребует еще меньшего времени. Эти данные показывают, что скорость физического распада руд в масштабе геологического времени чрезвычайно велика. Вряд ли прав В.А. Войлошников [22], полагая, что в природных условиях физическое выветривание идет еще быстрее, чем следует из экспериментальных данных. Однако нет оснований считать, что оно более замедленно, чем это следует из опытов, выполненных как нами, так и другими исследователями.

Оценивая палеогеографическое значение физического выветривания, следует отметить, что этот фактор иногда необоснованно игнорируется, как якобы имеющий второстепенное значение. Физический

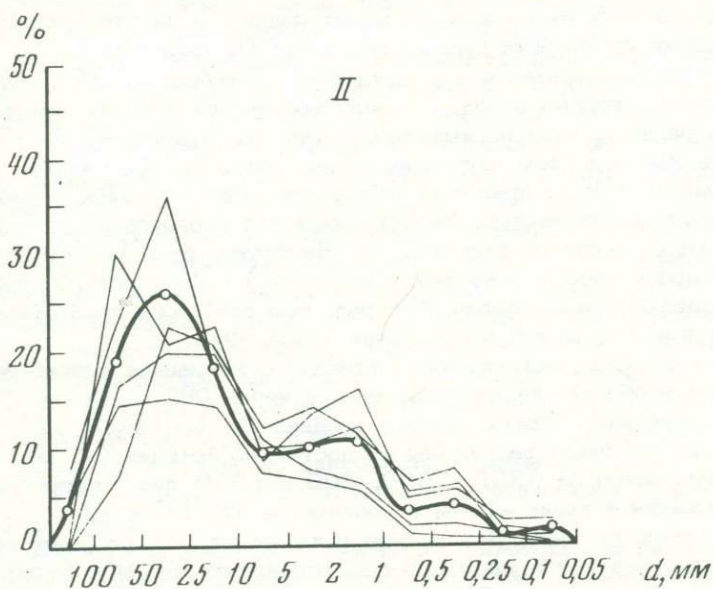
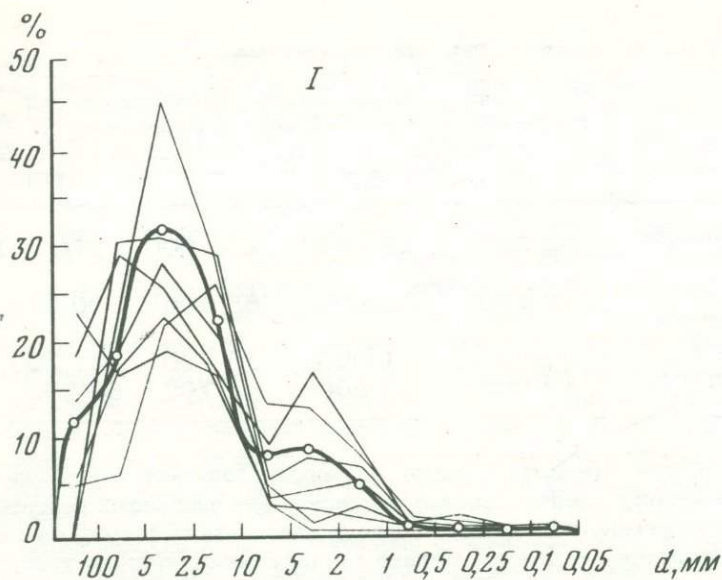
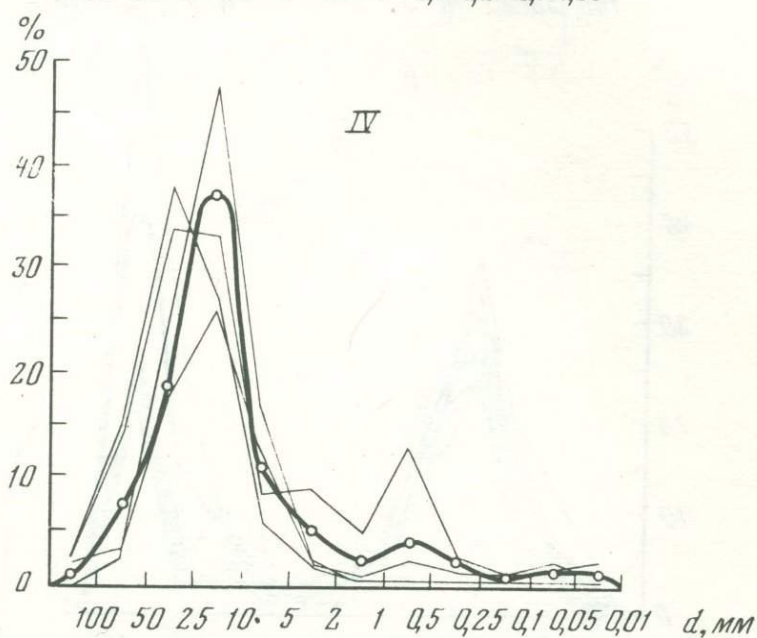
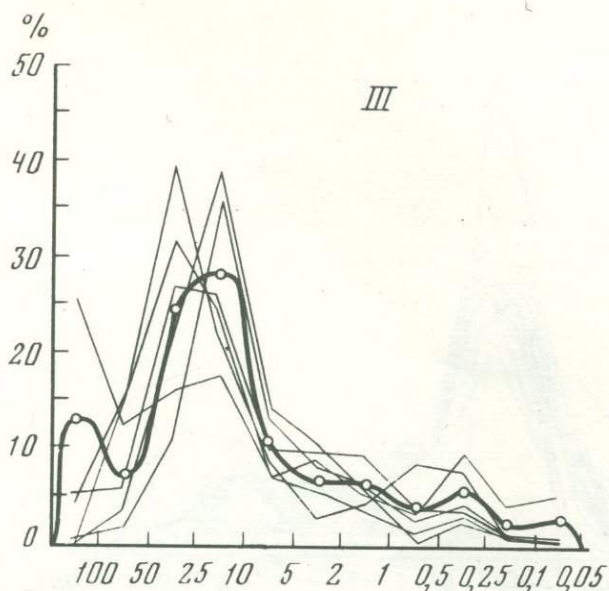


Рис. 66. Эволюция гранулометрических спектров терригенного материала в морфолитогенетической системе водораздел - склон - русло

I-III - аллювий в долине р.Ойра в горной (I) предгорной (II) и равнинной приустьевой (III) частях; IV - элювиальные и делювиальные отложения в верховьях р.Чаун; V - аллювий р.Чаун в пределах горно-холмистой части; VI - гранулометрический состав аллювия в



пределах равнинно-низменной (придельтовой) части; VII-VIII - отложения погребенной россыпи в пределах изменности (VII - гравийно-песчаные и алевроито-пелитовые осадки, VIII - кварцевый материал, из которого состоит продуктивный пласт россыпи); графики: 1 - без усреднения; 2 - по средним значениям

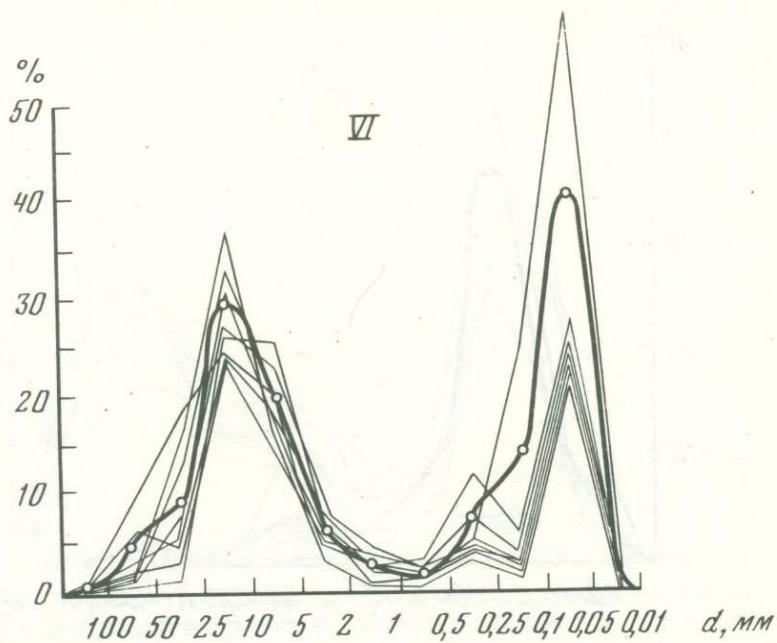
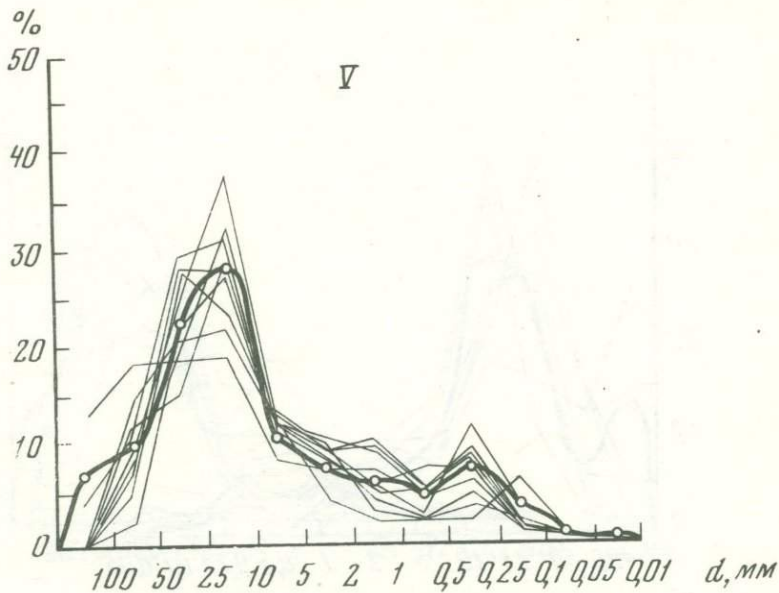


Рис. 66 (продолжение)

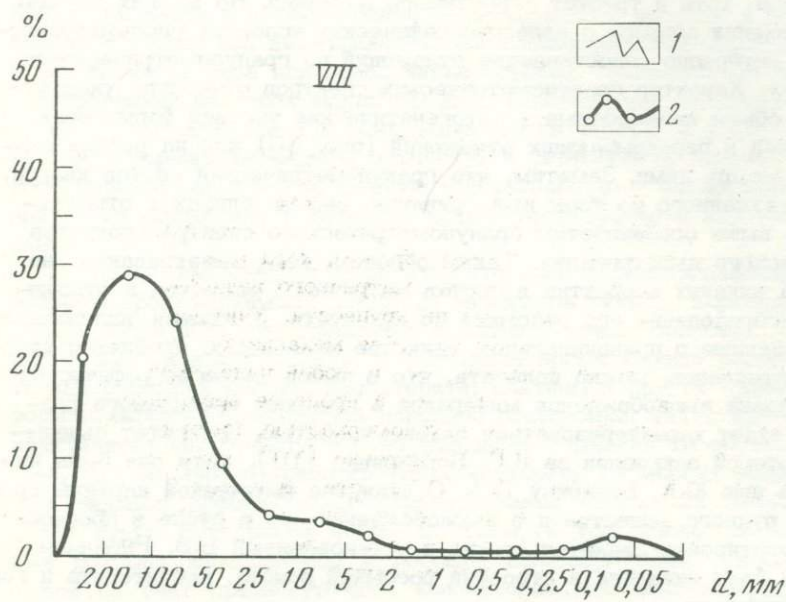
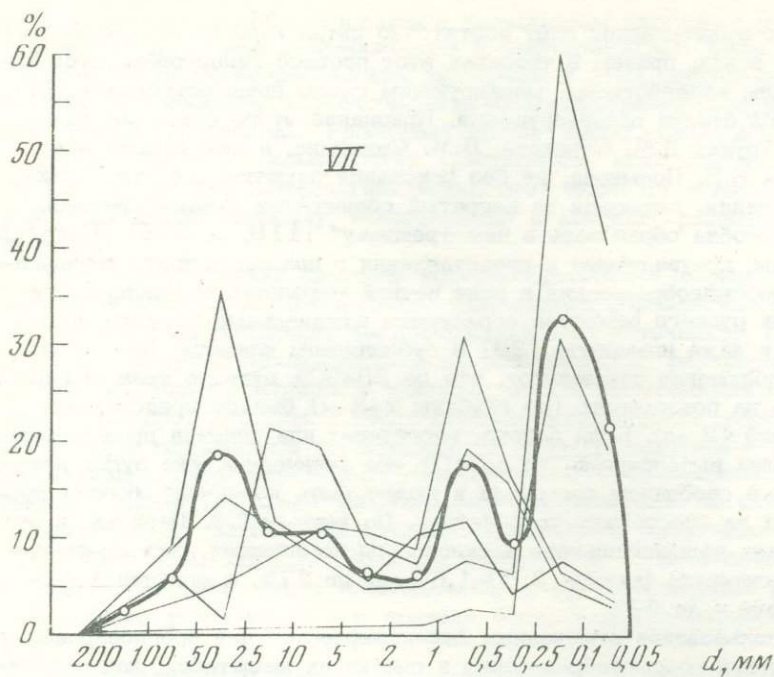


Рис. 66 (окончание)

процесс выветривания идет достаточно интенсивно во всех климатических зонах, причем в тропиках этот процесс гипертрофируется химическим воздействием, маскирующим следы предшествовавшей физической стадии предразрушения. Признание этого факта мы находим в трудах Н.М. Страхова, В.М. Синецина, а еще раньше - в работах Б.Б. Полюнова, не без оснований заметившего, что "дождевая капля, падающая на нагретый солнечными лучами кремль, уже способна образовать в нем трещинку" [119, с. 328]. С другой стороны, преувеличены и представления о полном запрете элювиального россыпьеобразования в зоне вечной мерзлоты. В зависимости от типа рудного вещества образуются элювиальные россыпи золота, олова и даже ильменита [28] в субполярном климате. Наши полевые наблюдения показывают, что до 25-30% рудного тела при выходе его на поверхность (до глубины 2-3 м) бывает представлено фракцией < 2 мм. Если золото, касситерит или платина представлены крупными выделениями, то до 40% его количества уже будет находиться в свободном состоянии и может быть извлечено обычной промывкой на простейших устройствах. По данным Г.Ф. Павлова, в отложениях водораздельного и склонового комплексов высвобождается касситерита фракции 3,30-1,69 мм до 27%, а фракции 1,69-0,59 мм - до 52%.

Использование отмеченных закономерностей для прогнозирования проявлений россыпьеобразования и оценки их масштабов, как отмечалось нами ранее [208], является полезным элементом методов прогноза, хотя и требует дальнейшего изучения. Во многих случаях при решении вопроса о палеогеографических условиях россыпьеобразования интересно сопоставление отложений по гранулометрическому составу. Характер гранулометрических спектров отчетливо указывает на общие ландшафтные и литогенетические условия формирования россыпей и перекрывающих отложений (рис. 66) или на резкие различия между ними. Заметим, что гранулометрический состав кварца, переотложенного из коры выветривания, весьма близок к отмечавшимся выше особенностям гранулометрического спектра продуктов физического выветривания. Таким образом, кора выветривания не внесла никаких корректив в состав матричного вещества в отношении распределения его обломков по крупности. Учитывая изложенные выше данные о принципиальном единстве механизмов дробления хрупких материалов, можно полагать, что в любой палеогеографической обстановке высвобождение минералов в процессе эрозийного размыва будет характеризоваться закономерностью, приоритет выявления которой закреплен за Н.Г. Бондаренко [10], хотя она была известна еще Ю.А. Билибину [9]. О единстве физической картины дробления рудного вещества и о высвобождении его в русле в процессе транспортировки свидетельствует и установленный Б.В. Рыжовым [137] факт сходства в строении россыпей золота, касситерита и горного хрусталя.

Резюмируя представления о роли палеогеографических факторов в россыпьеобразовании, следует отметить, что учет их будет посто-

янно возрастать, особенно в связи с проведением поисковых работ в пределах различных депрессионных и аккумулятивных форм рельефа. Главнейшим палеогеографическим критерием в этом случае является дифференцированность неотектонического структурного основания зон низменного рельефа. Различные блоки, валы, купола, поднятия в цоколе впадин и низменностей (разумеется, если они находятся на простирании металлогенических зон) первыми должны подвергаться геофизическому исследованию и поисково-разведочному бурению.

Роль климатических факторов россыпеобразования должна оцениваться не абстрактно, а конкретно для каждого формационного и минерального типа россыпных месторождений и их источников. Если речь идет о прогнозировании элювиальных россыпей, развивающихся по ультраосновным породам и имеющих мелкие минеральные включения, то следует находить в тектоно-геоморфологической эволюции фазы покоя и коррелятивные им образования, формировавшиеся в условиях активной роли химического выветривания. Перспективы россыпей с более крупными минеральными включениями за счет концентрированных источников следует связывать с эрозионными врезами. При этом хрупкие минералы пониженной сопротивляемости к транспортировке будут локализованы в верхних звеньях речной сети, более устойчивые — в долинах более высоких порядков, и т.д.

Литогенетические факторы палеогеографических обстановок также достаточно обоснованно вытекают из развиваемых нами представлений. К их числу относятся более грубозернистые прослои в разрезах переотложенных кор выветривания, слои мономиктовых образований в основании разреза или среди напластований. Полезную информацию о направлении палеорек могли бы дать исследования по ориентировке зерен, слоистости осадков, микроморфологии частиц, а также построение карт терригенно-минералогических и питающих провинций, литолого-формационных и т.д. Ценную информацию дает исследование глинистых минералов в качестве индикаторов зрелости кор выветривания.

В заключение следует отметить, что если палеогеографические вопросы прогнозирования россыпей минералов титана, циркония, тантала, ниобия и других элементов в платформенных областях, связанных с корами выветривания, в настоящее время хорошо разработаны, то для россыпей золота, касситерита, платины и других минералов, формирующихся в эрозионной долиненной обстановке, таких критериев практически нет. Между тем не вызывает сомнения то обстоятельство, что по мере разработки таких критериев во многих традиционных районах промышленного использования россыпных месторождений будут выявляться новые их типы, в том числе элювиальные россыпи палеорельефа и россыпи дальнего сноса, формирующиеся за счет промежуточных коллекторов или переотложения продуктов кор выветривания в соответствующей гидродинамической обстановке.

## КРИТЕРИИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕЛЬТОВЫХ РОССЫПЕЙ

К настоящему времени в геологии россыпей можно считать твердо установленным тот факт, что наиболее благоприятными для россыпеобразования являются условия тесной пространственной сопряженности коренных источников и возникающих за их счет россыпных проявлений. Такие россыпи называются автохтонными, россыпями ближнего сноса и т.п. Однако вряд ли можно сомневаться и в том, что в определенных случаях концентрация ценных минералов вблизи коренного источника не наблюдается. Это может быть связано с небольшими запасами в самом источнике, с затрудненностью высвобождения минералов из руд на ранних стадиях эродирования, с пониженной крупностью минералов и т.д. Например, золото и многие другие минералы, при определенных размерах частиц (см. табл. 40), имеют высокую подвижность в речном русле. Анализ геологических данных по различным районам мира свидетельствует о том, что, в частности, золото с размером частиц менее 0,2 мм может давать весьма крупные скопления. Зонами локализации таких фракций россыпеобразующих минералов могут быть дельты крупных рек.

В последние годы, судя по многочисленным публикациям в зарубежной периодике, значительно возрос интерес к дельтам рек, как в отношении их роли в гидротехнике и судоходстве, так и с геологической точки зрения. Дельта является зоной ежегодно возобновляемого осадконакопления. В целом масса терригенного материала, приносимого в зону дельты, огромна. По данным Х.Н. Фиска и Е. Мак-Фарлана (младшего) [177], в течение верхнечетвертичного цикла эрозии Миссисипи вынесла в Мексиканский залив 8000 кубических миль осадков (рис. 67). При этом ежегодное поступление осадков в зону дельты составляло около полутора миллионов тонн. Естественно, что даже при незначительном среднем поступлении тех или иных минералов в зоне дельты аккумулируются колоссальные запасы минерального сырья, причем в наиболее удобной для использования диспергированной форме.

По оценкам М.И. Львовича [85], во взвешенном состоянии могут переноситься значительные количества золота. Естественно, что поступающие в дельты минералы находятся в рассеянном состоянии. Однако выполненные нами эксперименты по изучению зоны сопряжения на участке река-море показывают, что дельты — это чрезвычайно сложно построенные литофациальные комплексы, в которых наблюдаются, кроме аккумулятивных, также перстративные и инстративные фазы осадкообразования и соответствующие этим фазам серии. Об этом, в частности, свидетельствует поперечный разрез дельтовых отложений Миссисипи (рис. 68). В низовьях р. Кольмы также наблюдается весьма сложная история геоморфологического развития, сопровождавшаяся блужданиями русла, перемывами отложений, врезами русла и т.п. Именно к таким проявлениям активизации русловых процессов могут быть приурочены скопления россыпеобразующих минералов (рис. 69). Таким образом, в связи с тем, что в зоне дельты происходит разгрузка наиболее крупных фракций твердого

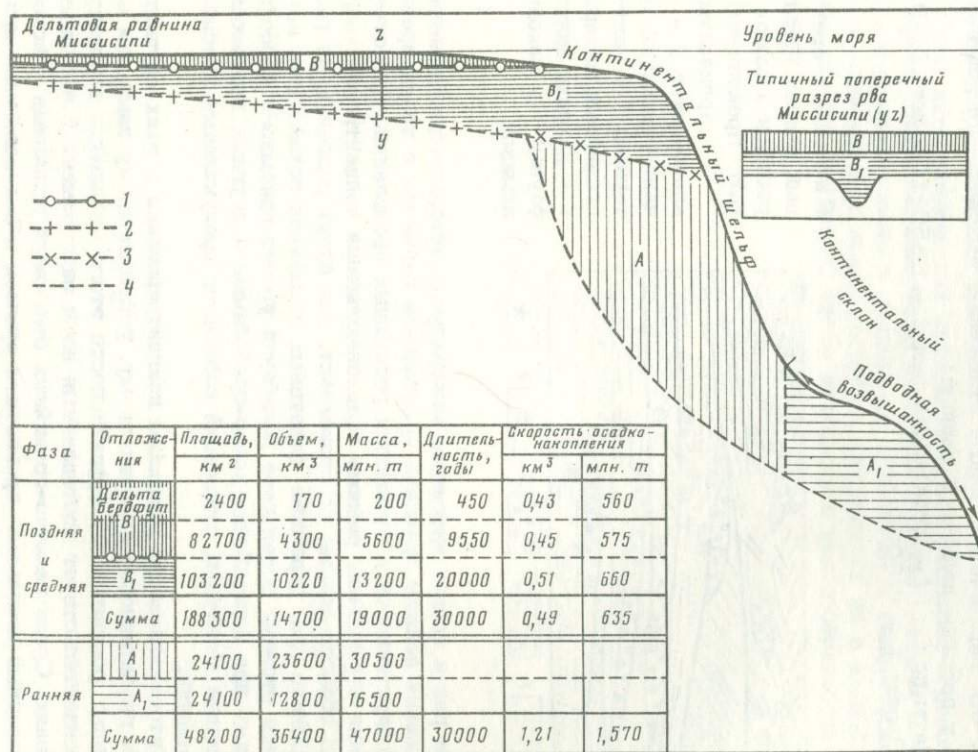


Рис. 67. Объем и скорость накопления верхне-четвертичных дельтовых отложений Миссисипи [177]

1 — поверхность, датированная в 1000 лет методом  $C_{14}$ ; 2 — профиль рва Миссисипи; 3 — песчаная дельта, погрувшаяся в раннюю фазу; 4 — доверхчетвертичный континентальный склон

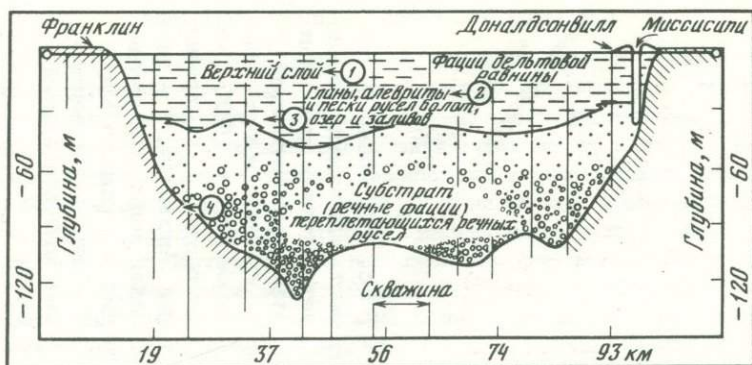


Рис. 68. Верхнечетвертичные отложения, выполняющие ров Миссисипи у вершины дельтовой равнины

Даты по  $C_{14}$ : 1 -  $2900 \pm 300$  лет; 2 -  $8850 \pm 150$  лет; 3 -  $9750 \pm 600$  лет; 4 -  $>28000$  лет

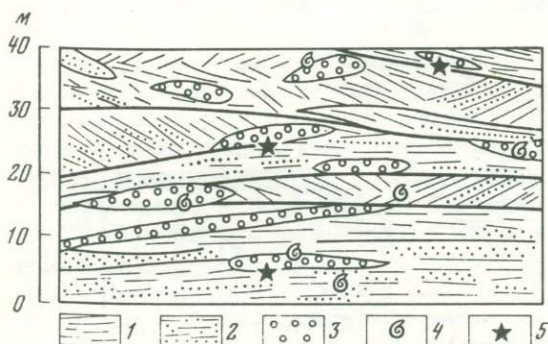


Рис. 69. Характерный разрез дельтовой россыпи алмазов (по Б.И. Прокопчуку)

1 - аргиллиты и алевролиты; 2 - песчано-глинистый материал; 3 - галечно-гравийный материал; 4 - находки морской фауны; 5 - находки алмазов

стока рек и осадка вносимых минеральных компонентов, дельтовые отложения должны привлечь пристальное внимание с точки зрения их продуктивности в отношении россыпных проявлений. Естественно, что при нормальном режиме осадконакопления концентрации минералов в области дельты не происходит, они будут рассеяны по разрезу. Однако при перемыве дельтовых отложений локальными врезающимися руслами вследствие колебаний уровня приемного бассейна, а также при переработке волно-прибойными и другими процессами, в разрезе дельтовых отложений возникает продуктивные прослои и пропластки.

Литогенетический механизм концентрирования в этих случаях близок к гравитационно-диффузионному, установленному нами для аллювиальных россыпей. Об эффективности этого механизма концентрации свидетельствует поставленный нами эксперимент в натуральных условиях. Среди галечно-гравийных отложений опробован участок, прорезанный локальным временным руслом, образовавшимся при временном подъеме уровня реки. Средние содержания тяжелых минера-

лов на участке размыва оказались на 15% (а по минералам электромагнитной фракции на 74%) выше, чем в не затронутом размывом слое, причем глубина вреза (амплитуда перемыва и переотложения минералов) составила всего 0,25 м.

Следы таких локальных врезов в виде линз, прослоев могут быть вложены в дельтовые фации, выделяясь более крупным материалом, его петрографическим составом, сортированностью, и могут образовывать целые серии таких инстративно-перстративных чередований. Литогенетические критерии поисков россыпей в дельтах разработаны довольно слабо, но в целом они должны опираться на комплекс обычных геологических методов при более тщательном штиховом и геохимическом опробовании скважин, с использованием различных съемочных методов и морфоструктурного анализа на крупномасштабной топографической основе.

Итак, литогенетические критерии поисков россыпей — довольно обширная область специальных вопросов, решение которых может быть конкретизировано в приложении к различным генетическим типам и минеральным видам россыпей. Обсуждение их в данной книге приведено весьма бегло, чтобы подчеркнуть целесообразность применения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершая характеристику главных физико-химических и литогенетических факторов и условий россыпеобразования, отметим, что структура данной книги существенно отличается от традиционных схем исследований по геологии россыпей. Как было показано в начальных разделах книги, выбранный способ изложения результатов наших исследований обусловлен необходимостью сосредоточить внимание на дискуссионных вопросах, нерешенность которых связана с устаревшими или слишком общими представлениями геологии россыпей. Из всего изложенного выше ясно, что выдвигаемые нами положения полностью укладываются в русло исследований, ведущих к решению теоретических и практических задач, стоящих ныне перед учением о россыпях. Если попытаться в сжатом виде охарактеризовать сущность проведенных исследований и основных результатов, то сводятся они к следующему.

К настоящему времени геология россыпей как ветвь науки о полезных ископаемых прошла довольно длительный путь развития — от первых ломоносовских воззрений до современного учения о россыпях, опирающегося на весь комплекс данных, накопленных в смежных областях знания: литологии, геохимии, металлогении, геоморфологии и т.д. В соответствии с этим в геологии россыпей наблюдается дифференциация исследований на ряд самостоятельных направлений, каждое из которых изучает наиболее существенные аспекты проблемы россыпеобразования. Однако в основе учения о россыпях должны лежать, несомненно, физико-химические и литогенетические представления, позволяющие понять процессы россыпеобразования вне зависимости от разнообразных и во времени меняющихся геолого-геоморфологических факторов. Таким образом, исследование физико-химических и литогенетических факторов россыпеобразования представляет собой генетическое направление в геологии россыпей, в развитии которого видел одну из своих задач автор. Выветривание горных пород и руд является самым универсальным процессом зоны гипергенеза вообще и россыпеобразования в частности. При этом важнейшим исходным положением для всех построений в геологии россыпей должен быть тезис о том, что выветривание коренных источников россыпных месторождений является процессом, так же резко отличающимся от выветривания коренных вмещающих пород, как различаются по комплексу свойств и признаков рудные тела и вмещающие их породы. При анализе физико-химических и литогенетических условий формирования россыпей выветривание рудных тел целе-

сообразно рассматривать как энергоемкий процесс разрушения кристаллохимической структуры матричного вещества, заключающего в себе ценные россыпеобразующие минералы. Этот процесс может идти одновременно, с той или иной степенью интенсивности, на разных энергетических уровнях.

Первый энергетический уровень (физическое выветривание) характеризуется затратами наиболее простых форм и минимальных количеств энергии. Процесс выветривания в этом случае ведет к диспергированию рудного материала на частицы различной крупности по разнообразным дефектным зонам и направлениям с ослабленными связями в структуре рудного вещества. На первом энергетическом уровне разрушение выражается главным образом в механическом рассоединении частиц матричного вещества и россыпеобразующих минералов. Это быстротечный процесс, происходящий в результате любых физических воздействий на рудное вещество: термодислокаций, фазовых переходов воды (жидкое — твердое состояние), биокоррозии, ударных воздействий и т.д. В целом все процессы, происходящие на первом энергетическом уровне, однотипны по своим деструкционным механизмам. Распад матричного вещества осуществляется в соответствии с теорией прочности и законами физики разрушения хрупких тел. Этот процесс в принципиальном отношении не зависит от конкретной формы разрушающего физического воздействия и приводит к формированию в начальной стадии выветривания гранулометрического спектра с одномодальным распределением размерных фракций. По мере развития выветривания формируется двух- или трехмодальный гранулометрический спектр, деформируемый в большей или меньшей степени наложением химических процессов, привнесом или выносом части дисперсного материала.

Второй энергетический уровень (химическое выветривание) требует больших удельных затрат энергии, причем иных ее форм: тепловой, электрокинетической, биогенной и т.п. Химическое выветривание заключается в разрушении наиболее прочных атомных и ионных связей. Этот процесс развивается также по наиболее ослабленным и дефектным зонам в матричном веществе и регулируется суммарным количеством тепла в зоне взаимодействий и поступлением жидкой фазы, составом матричного вещества и числом подготавливаемых физическим выветриванием частиц с неравновесными (неустойчивыми) атомно-ионными связями, на которые в первую очередь воздействуют протоны или гидроксильные группы жидкой фазы. Как при физическом, так и при химическом типе выветривания образуются растворенные и дисперсные продукты (жидкая и дисперсная фазы). При сравнении физического и химического выветривания по интенсивности продуцирования фракции <1 мм установлено, что физическое выветривание в десятки раз активнее, чем химическое.

Детальный анализ физико-химических механизмов выветривания рудного вещества приводит к выводу, что процесс выветривания зависит от многих переменных величин. Поэтому ранее оказывались безуспешными попытки решить проблему выветривания в геологии россыпей на основе общих представлений. В действительности ре-

шение этой проблемы многозначно, оно принимает то или иное выражение в зависимости от конкретных механизмов и процессов выветривания, регулируемых минеральным и химическим составом рудного вещества, его физико-механическими свойствами (прочность, пористость, размер минералов, структура), энергетическим уровнем окружающей среды, а также в очень большой степени темпом эрозивно-денудационного расчленения продуктивных тел — источников россыпеобразующих минералов. Следовательно, выветривание есть конвергентный геологический процесс, принимающий различные значения при различных сочетаниях определяющих этот процесс факторов.

В определенных и весьма распространенных случаях (при значительной гидравлической крупности россыпеобразующих минералов и повышенной химической устойчивости матричного вещества) наиболее интенсивное разрушение рудного материала как вариант физического выветривания происходит непосредственно в речном русле. При этом процесс россыпеобразования оказывается не зависящим от широтно-климатической зональности. В результате формируется широкий минеральный спектр аazonальных россыпных месторождений главным образом аллювиального генетического типа. Основная генетическая функция в образовании таких россыпей принадлежит обычной эрозивно-флювиальной деятельности речных русел, в главных своих чертах весьма сходной во всех климатических зонах, в которых известны аллювиальные россыпи.

Среди литогенетических условий россыпеобразования также может быть выделен ряд параметров, определяющих поведение россыпеобразующих минералов в водном потоке. Прежде всего это параметры водно-аллювиальной среды: в целом кинетическая структура водного потока, вертикальная составляющая скорости, крупность аллювия дна, геометрическая и гидравлическая крупность минеральных частиц. В зависимости от сочетания этих параметров преобладает тот или иной механизм концентрации минералов — от гравитационно-диффузионного до миграционного, доминирует процесс дробления или корразии аллювиального материала и развиваются другие явления в водно-аллювиальной среде.

Физико-химические и литогенетические факторы россыпеобразования не меняют своей сущности на протяжении всей геологической истории формирования россыпных месторождений, хотя количественная сторона россыпеобразующего процесса связана с взаимодействием тектоно-геоморфологических и металлогенетических факторов и может быть ослаблена или усилена в зависимости от конкретных условий. Таким образом, процесс россыпеобразования в целом можно рассматривать как эволюционирующую во времени и пространстве динамическую систему физико-химических и литогенетических превращений первичного рудного вещества, в итоге которых в зоне гипергенеза происходит рассеяние одних (мигрантных) элементов и минералов и относительное накопление других (антимигрантных) элементов и минералов.

В качестве итоговых выводов можно сформулировать несколько положений. Часть из этих положений имеет характер достаточно

убедительных, на наш взгляд, утверждений, а другая приводится в качестве постановки вопросов для дальнейших исследований.

1. Объективной необходимостью в современном состоянии науки о россыпях является переход от общих, подчас умозрительных представлений по теории россыпеобразования к дифференцированному анализу конкретных вариантов формирования россыпных месторождений на основе углубленного изучения физико-химических и литогенетических механизмов этого процесса и определяющих его факторов.

2. Распределение россыпных месторождений на поверхности Земли подчиняется прежде всего пространственному положению планетарных рудных поясов, металоогенетических зон и районов; роль климата проявляется неоднозначно для различных минеральных типов месторождений, что приводит к формированию как зональных, так и азональных россыпных месторождений.

3. Климатический фактор является не абсолютным, а относительным фактором россыпеобразования: его значение возрастает при формировании россыпей за счет коренных источников, содержащих россыпеобразующие минералы в рассеянном состоянии и требующих предварительного обогащения в корах химического выветривания с последующим концентрированием в седиментационных обстановках с пониженной динамичностью среды.

4. Роль климатического фактора россыпеобразования резко снижается при формировании россыпных месторождений за счет коренных источников, содержащих минералы с резко выраженными антимиграционными свойствами: повышенной геометрической и гидравлической крупностью, хрупкостью или истираемостью; в этом случае главное значение принадлежит обычной эрозионной деятельности водных потоков, перерабатывающих огромные массы рудного материала вне зависимости от климатической обстановки, а объем переработанного материала и количество накапливаемых минералов (их запасы) зависят от амплитуды и темпов тектонического поднятия металлоносной структуры, от состава и строения матричного вещества.

5. Изучение различных минеральных типов россыпных месторождений нуждается в строго дифференцированном анализе всех стадий формирования россыпей каждого минерального вида; при наличии общих генетических особенностей и закономерностей в процессах россыпеобразования могут быть выявлены специфические особенности на различных стадиях формирования россыпей каждого минерала, требующие особых поисковых и оценочных методов.

6. Элювиально-делювиальные, а также суффозионно-остаточные и дельтовые россыпи заслуживают более углубленного изучения с точки зрения геологической проспекции как россыпных, так и коренных месторождений; поиски россыпей в пределах равнинного и низменного рельефа могут быть успешными только при использовании в комплексе поисковых методов литогенетических критериев выявления продуктивных слоев и седиментационных ритмов.

7. В цикле исследовательских работ по геологии россыпей все более актуальным становится углубленное изучение вещественного состава осадков и применение геохимической методологии на стадии

полевых исследований и камерального анализа фактических данных.

8. Установленные выше соотношения физического и химического выветривания, энергетическая обусловленность этих процессов, их роль в морфогенезе поверхности Земли и континентальном литогенезе представляют собой проблему фундаментального геологического значения для решения многих задач регионального почвоведения, ландшафтоведения и изучения эволюции терригенного материала на поверхности суши в целом.

Помимо сформулированных выше выводов, автору хотелось бы высказать надежду, что изложенные в книге данные и их обсуждение, во-первых, помогут приблизиться к удовлетворительному решению некоторых теоретических задач, относящихся к физико-химическим и литогенетическим основам геологии россыпей, и, во-вторых, будут способствовать устранению хотя бы некоторых из тех заблуждений, которые все еще бытуют в науке о россыпях. Ибо к геологии россыпей, как, может быть, ни к какой другой из наук, относится замечание В.И. Вернадского о том, что геология полна пережитками прошлого [23].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алмазные месторождения Якутии/А.П.Бобривич, М.Н.Бондаренко, М.А.Гневушев, Л.М.Красов, Г.И.Смирнов, Р.К.Юркевич. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 525 с.
2. *Баас Беккин Л.Г.М., Каплан И.Р., Мур Д.* Пределы колебаний рН и окислительно-восстановительных потенциалов природных сред. — В кн.: Геохимия литогенеза. М.: Изд-во иностр. лит., 1963, с. 11—84.
3. *Бабкин П.В., Розенблюм И.С., Пермляков А.П.* Россыпи киновари на Северо-Востоке СССР. — ДАН СССР, 1977, т. 235, № 6, с. 1371—1374.
4. *Баталов В.Д.* Некоторые закономерности формирования руслового аллювия. — Учен. зап. Перм. ун-та, 1968, № 170, с. 3—17.
5. *Батурич В.П.* Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 335 с.
6. *Башкиров В.Г.* Расчетные тектонофизические условия образования структурной зональности, определяющей форму рудных тел. — В кн.: Эксперимент и моделирование в структурообразующих процессах рудогенеза. Новосибирск: Наука, 1976, с. 160—165.
7. *Белов Н.В.* Кристаллохимия силикатов с крупными катионами. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 66 с.
8. *Бетезгин А.Г.* Платина. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1935. 140 с.
9. *Билибин Ю.А.* Основы геологии россыпей. М.; Л.: ГОНТИ, 1938. 501 с.
10. *Бондаренко Н.Г.* Образование, строение и разведка россыпей. М.: Недра, 1975. 56 с.
11. *Боул С., Хоул Ф., Мак-Крекен Р.* Генезис и классификация почв. М.: Прогресс, 1977. 415 с.
12. *Бриджмен П.* Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностр. лит., 1955, с. 444.
13. *Булмаков В.С., Дешевых Е.В.* О россыпеобразующей продуктивности руд золото-кварцевой формации. — В кн.: Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Магадан: Кн. изд-во, 1978, с. 123—130.
14. *Бурмин Ю.А.* Элювиальные россыпи неметаллических полезных ископаемых. — В кн.: Неметаллические полезные ископаемые коры выветривания. М.: Наука, 1977, с. 39—50.
15. *Бушинский Г.И.* О выветривании, промывном гидролизе и проточном диагенезе. — Литология и полезные ископаемые, 1977, № 6, с. 32—44.
16. *Вагнер П.А.* Месторождения платины и рудники Южной Африки. М.; Л.: Цветметиздат, 1932, с. 272.
17. *Валлетер А.П.* Россыпи террасовалов и некоторые вопросы их поисков. — Колыма, 1963, № 7, с. 36—39.
18. *Валлетер А.П.* Поверхность выравнивания и особенности ее развития в Яно-Колымской складчатой системе: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Л., 1969. В надзаг.: ВСЕГЕИ. 24 с.
19. *Веклич М.Ф.* Палеогеографический метод поисков россыпей. — В кн.: Древние и погребенные россыпи СССР. Ч. I. Киев: Наук. думка, 1977, с. 17—20.
20. *Великанов М.А.* Гидрология суши. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 403 с.

21. *Великий Н.М.* Основные особенности накопления и значение титаноносного аллювия. — В кн.: Аллювий. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1976, с. 82–87.
22. *Войлошников В.А.* Выветривание в таежном Приангорье. — Зап. Заб. фил. Геогр. о-ва СССР, 1970, вып. СЛІ (41), с. 22–27.
23. *Володин А.Г.* Закономерности формирования полезных ископаемых осадочных отложений. М.: Недра, 1975. 272 с.
24. *Вольфсоң Ф.И., Некрасов Е.М.* Основы образования рудных месторождений. М.: Недра, 1978. 224 с.
25. *Воскресенский С.С.* Формирование приплотиковых горизонтов аллювиальных отложений. — В кн.: Вопросы морфолитогенеза в речных долинах. Чита: Изд-во Заб. фил. геогр. о-ва, 1968, с. 8–10.
26. *Воскресенский С.С.* Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М.: Изд-во МГУ, 1971. 228 с.
27. *Гаррелс Р., Маккензи Ф.* Эволюция осадочных пород. М.: Мир, 1974. 272 с.
28. *Герасимов Н.Н.* Некоторые закономерности размещения элювиальных и делювиальных россыпей в Читинской области. — В кн.: Закономерности размещения полезных ископаемых. М.: Изд. лит. по горн. делу, 1969, т. 4, с. 248–250.
29. *Герасимов И.П.* Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы геологического строения СССР. — В кн.: Проблемы физической географии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946, т. 12.
30. *Гинзбург И.И.* 1. Вопросы энергетики реакции процессов выветривания некоторых алюмосиликатов. — В кн.: Кора выветривания. М.: Изд-во АН СССР, 1963, вып. 5, с. 78–118.
31. *Гинзбург И.И.* 2. Типы древних кор выветривания, формы их проявления и классификация. — В кн.: Кора выветривания. М.: Изд-во АН СССР, 1963, вып. 6, с. 71–101.
32. *Глязовская М.А.* Выветривание горных пород в нивальном поясе Центрального Тянь-Шаня. — В кн.: Выветривание и почвообразование. /Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 1950, т. 34, с. 28–49.
33. *Гольдфарб Ю.И.* Стратиграфия четвертичных отложений золотоносных районов верховьев р. Колымы и возраст россыпей: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Магадан, 1971. В надзаг.: ГИН АН СССР.
34. *Гордон Дж.* Почему мы не проваливаемся сквозь пол. М.: Мир, 1971. 270 с.
35. *Горюнов Ю.В.* Эффект Ребиндера. М.: Наука, 1966. 128 с.
36. *Грабецкая Н.А.* Особенности вещественного состава покровных отложений различных климатических зон. — Зап. Забайк. фил. геогр. о-ва СССР, 1970, вып. СЛІ (41), с. 12–15.
37. *Гриффитс Дж.* Научные методы исследования осадочных пород. М.: Мир, 1971. 421 с.
38. *Гурвич С.И.* Закономерности размещения редкометалльных и оловоносных россыпей. М.: Недра, 1978. 221 с.
39. *Давиденко Н.М.* Повышение пробы самородного золота при переходе его в россыпь. Геология и геофизика. М., 1966, № 12, с. 116–117.
40. *Давиденко Н.М.* Минеральные ассоциации и условия формирования золотоносных кварцевых жил Мало-Ануйского района Западной Чукотки. Новосибирск: Наука, 1975. 134 с.
41. *Давиденко Н.М., Шумилов Ю.В.* Признаки генетической связи россыпей с коренными источниками на севере Дальнего Востока СССР. — В кн.: Вопросы геологии и океанологии Советского сектора Тихоокеанского подвижного пояса. Владивосток, 1968, с. 204–211.
42. *Дитмар А.В.* О малой подвижности золота при эрозионных процессах на примере рудопроявлений ручья Игривого в Корякском нагорье. — Учен. зап. НИИГА, 1968, вып. 13, с. 83–95.

43. Добровольская Н.Г. Особенности субкавального выветривания (на примере рек Лены и Кара-Бай): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук, 1977. В надзаг.: МГУ. 25 с.
44. Дьяков А.Г., Борташинский З.В. Транспортировка и характер износа алмазов аллювиальных россыпей Западной Якутии. — В кн.: Алмазы Якутии. (Тр. Якутск. фил. СО АН СССР), 1961, сб. № 6, с. 123—135.
45. Еременко Г.К., Полканов Ю.А., Витриченко Э.А. Космогенное вещество в россыпях. — В кн.: Древние и погребенные россыпи СССР. Киев: Наук. думка, 1977, ч. 1, с. 68—76.
46. Желнин С.Г. Особенности россыщеобразующих формаций золота на Северо-Востоке. — В кн.: Новые данные по геологии Северо-Востока СССР. Магадан, 1973, с. 239—273. (Тр. Сев.-Вост. КНИИ ДВНЦ АН СССР; Вып. 55).
47. Желнин С.Г. Условия образования аллювиальных россыпей золота на Северо-Востоке Азии. М.: Наука, 1979. 120 с.
48. Зялинцев Л.И., Томашевская И.С. Зарождение и развитие трещинных структур в горных породах. — В кн.: Эксперимент и моделирование в структурообразующих процессах рудогенеза. Новосибирск: Наука, 1976, с. 105—116.
49. Зильберманц А.В., Лабутин А.Н. Оловородные формации Северо-Востока Азии. — В кн.: Оловоносность Арктической и Субарктической зон Советского сектора Восточной Азии. Магадан, 1973, с. 10—46. (Тр. Сев.-Вост. КНИИ: Вып. 48).
50. Иенни Г. Факторы почвообразования. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. 259 с.
51. Имшенецкий А.И. О концентрации тяжелых минералов в аллювии по данным экспериментальных работ. — Сов. геология, 1950, № 7, с. 81—88.
52. Казакевич Ю.П. Особенности строения погребенных россыпей Восточной Сибири и их главные поисковые критерии. — В кн.: Проблемы геологии россыпей. Магадан, 1970, с. 225—231.
53. Казанский Ю.П. Выветривание и его роль в осадконакоплении. М.: Наука, 1969. 128 с.
54. Карпентьлиц М.Х., Дражин С.И. Строение вещества. М.: Высшая школа, 1978. 304 с.
55. Карташов И.П. Флювиальные рельефообразующие процессы. Магадан, 1957, с. 1—21. (Тр. ВНИИ Геология: Вып. 1).
56. Карташов И.П. Фации, динамические фазы и свиты аллювия. — Изв. АН СССР, 1961, № 9, с. 77—90.
57. Карташов И.П. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран (на примере Северо-Востока СССР). М.: Наука, 1972. 180 с. (Тр. ГИН; Вып. 245).
58. Каушанская П.И. Возникновение внутренних напряжений в пористом теле при образовании хроматографических зон кристаллических осадков. — В кн.: Физико-химическая динамика процессов магматизма и рудообразования. Новосибирск: Наука, 1971, с. 165—171.
59. Кашик С.А. Физико-химические условия формирования некоторых минералов и минеральных ассоциаций при осадочном породообразовании. — В кн.: Физические и химические процессы и фации. М.: Наука, 1968, с. 100—108.
60. Кашменская О.В. Дальность переноса золота как функция развития рельефа. — В кн.: Транспортировка полезных ископаемых в россыпях. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975, с. 43—44.
61. Келлер У.Д. Основы химического выветривания. — В кн.: Геохимия литогенеза. М.: Изд-во иностр. лит., 1963, с. 85—195.
62. Китч Л. Морфология Земли. М.: Прогресс, 1967. 559 с.
63. Колесов С.В. О проседании золотин в аллохтонных аллювиальных и прибрежно-морских россыпях. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1974, № 1, с. 61—64.

64. *Конищев В.Н.* Криогенное выветривание как фактор формирования лёссовидных образований Северной Евразии: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 1978. В надзаг.: МГУ. 51 с.
65. *Куззов П.А.* Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1971. 257 с.
66. *Краускопф К.Б.* Геохимия кремнезема в среде осадкообразования. — В кн.: Геохимия литогенеза. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. с. 210–233.
67. *Крейтер В.М.* Структуры рудных полей и месторождений. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 270 с.
68. *Кризер Н.И.* Континентальный литогенез как элемент физико-географического процесса. — ДАН СССР, 1970, т. 191, № 6, с. 1374–1377.
69. *Кузнецов В.И.* Чешуйчатые сколы и их роль в формировании тел месторождений полезных ископаемых. — В кн.: Эксперимент и моделирование в структурообразующих процессах рудогенеза. Новосибирск: Наука, 1976, с. 198–200.
70. *Куховский Е.Г.* Некоторые соображения о кристаллохимических особенностях выветривающихся минералов. — В кн.: Кора выветривания. М.: Изд-во АН СССР, 1963, вып. 6, с. 67–69.
71. *Кухаренко А.А.* Минералогия россыпей. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 318 с.
72. *Ламакин В.А.* О динамической классификации речных отложений. — Землеведение, 1950, т. 3 (43).
73. *Ларичкин В.А.* Промышленные типы месторождений олова. — Сов. геология, 1975, № 6, с. 37–49.
74. *Лебедев В.И.* Основы энергетического анализа геохимических процессов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. 342 с.
75. *Леммлейн Г.Г.* Морфология и генезис кристаллов. М.: Наука, 1973. 327 с.
76. *Линдгрэн В.* Минеральные месторождения. М.; Л.; Грозный; Новосибирск: Научно-техн. горно-геолого-нефтяное изд-во, 1934, вып. 11. 226 с.
77. *Лисицын А.П.* Основные закономерности распределения современных кремнистых осадков и их связь с климатической зональностью. — В кн.: Геохимия кремнезема. М.: Наука, 1966, с. 90–191.
78. *Лисицына Н.А.* Коррозия кварца в мезо-кайнозойской коре выветривания Северного Казахстана. — ДАН СССР, 1957, т. 114, № 4, с. 862–865.
79. *Логвиненко Н.В.* О выветривании и промывном гидролизе. — Литология и полезные ископаемые, 1978, № 5, с. 144–149.
80. *Логина И.Э.* О гравитационной дифференциации тяжелых минералов в склоновых отложениях в связи с россыпеобразованием. — В кн.: Древние и погребенные россыпи СССР. Киев: Наук. думка, 1977, ч. 1, с. 61–68.
81. *Ломоносов М.В.* Сочинения: В 8-ми т. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 5.
82. *Лугов С.Ф.* Основные черты геологического строения и металлоносности Чукотки. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 226 с.
83. *Луцев Б.С.* Дифференциация осадков в современном аллювии. — Учен. зап. Перм. ун-та, 1967, № 174. 333 с.
84. *Львович М.И.* Гидравлическая крупность частиц россыпного золота. — Тр. треста "Золоторазведка" и ин-та НИГРИЗОЛОТО, 1938, вып. 8, с. 99–129.
85. *Львович М.И.* Количество золота, транспортируемого р. Сутар. — Тр. треста "Золоторазведка" и ин-та НИГРИЗОЛОТО, 1938, вып. 8, с. 158–168.
86. *Маккаев Н.И.* Русло реки и эрозии в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 345 с.
87. *Макклинтон Ф., Аргон А.* Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. 439 с.
88. *Мандаров А.А.* Связь между температурой поверхности луга и температурой воздуха в летнее время. — В кн.: Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. М.: Недра, 1972, с. 97–101.

89. *Мандыч А.Ф.* Влияние волн паводков горных рек на расход наносов. — Метеорология и гидрогеология, 1966, № 2, стр. 41—43.
90. *Матвеева Л.А.* Экспериментальное и теоретическое обоснование механизма взаимодействия воды с породой при выветривании. — В кн.: Кора выветривания и гипергенное рудообразование. М.: Наука, 1977, с. 123—133.
91. *Махнач А.С., Левых Н.Н.* Литология и геохимия кор выветривания, развитых на кристаллическом фундаменте Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1973. 288 с.
92. *Мацуев Л.П.* К вопросу об определении скорости свободного падения твердых тел в жидкости. — Тр. ВНИИ-1, Магадан, 1960, вып. 47, с. 231—281.
93. *Мещеряков Ю.А.* О происхождении крупных форм рельефа Русской равнины. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1953, № 5, с. 14—28.
94. *Мицюк Б.М.* Взаимодействие кремнезема с водой в гидротермальных условиях. Киев: Наук. думка, 1974. 78 с.
95. *Наумов Е.М., Градусов Ю.П., Цюрупа И.Г.* О таежном почвообразовании на северо-востоке Сибирской мерзлотной области. — В кн.: Почвенный криогенез (к 10-му Междунар. конгр. почвоведов, Москва, 1974). М.: Наука, 1974, с. 34—77.
96. *Нестеренко Г.В., Воронников Б.А., Осинцев С.Р.* Поведение золота и элементов-спутников в процессе разрушения рудных выходов. — В кн.: Золото и редкие элементы в геохимических процессах. Новосибирск: Наука, 1976, с. 140—166.
97. *Нестеренко Г.В.* Происхождение россыпных месторождений. Новосибирск: Наука, 1977. 312 с.
98. *Никитин И.К.* Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. Киев: Изд-во АН УССР, 1963. 142 с.
99. *Никитина И.Б.* Геохимия ультрапресных вод мерзлотных ландшафтов. М.: Наука, 1977. 146 с.
100. *Николаев Н.И.* Неотектоника (к итогам совещания по вопросам новейших достижений и деформаций земной коры). — Бюл. МОИП. Отд. геол., 1948, т. 23 (5).
101. *Николаева Л.А.* Генетические особенности самородного золота как критерии при поисках и оценке руд и россыпей. М.: Недра, 1978. 101 с.
102. *Нотт Дж.Ф.* Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978. 256 с.
103. *Обручев В.А.* Основные черты кинетики и пластики неотектоники. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1948, № 5, с. 5—13.
104. *Окамото Го, Тахеси Окура и Куцуми Гото.* Свойства кремнезема в воде. — В кн.: Геохимия литогенеза. М.: Изд-во иностр. лит., 1963, с. 196—209.
105. *Орлова З.В., Толокольников А.И., Шумилов Ю.В.* О возрасте золотоносного аллювия бассейна Малого Аюя. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1973, с. 45—56.
106. *Орлова З.В., Шумилов Ю.В.* О гранулометрической дифференциации золотоносного аллювия малых и средних водотоков горного типа на примере Северо-Восточного Приколымья (Западная Чукотка). — Учен. зап. Перм. ун-та, 1973, № 266, с. 3—16.
107. *Осовецкий Б.М.* О связи минерального состава тяжелой фракции аллювиальных отложений с их гранулометрией. — Литология и полезные ископаемые, 1974, № 1, с. 96—109.
108. О характере поведения золота в водно-аллювиальной среде при образовании россыпных месторождений (по данным экспериментов)/Шумилов Ю.В., Желнин С.Г., Сальманова В.А., Анисимова Т.В. — Колыма, 1977, № 1, с. 43—48.
109. *Павлова Н.Н.* Трещиноватость и разрушение горных пород. М.: Наука, 1970. 94 с.

110. *Парфенова Е.И.* Исследование примитивных горно-луговых почв на диоритах хребта Матишо (Северный Кавказ). — Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 1950, т. 34, с. 49–108.
111. *Педро Ж.* Экспериментальные исследования геохимического выветривания кристаллических пород. М.: Мир, 1971, с. 251.
112. *Петровская Н.В.* Самородное золото. М.: Наука, 1973. 328 с.
113. *Петровская Н.В.* О некоторых общих вопросах проблемы тонкой неоднородности индивидов минералов и их агрегатов. — В кн.: Неоднородность минералов и тонкие минеральные смеси. М.: Наука, 1977, с. 3–15.
114. *Петров В.П.* Современные проблемы учения о коре выветривания. — В кн.: Неметаллические полезные ископаемые коры выветривания. М.: Наука, 1977, с. 9–39.
115. *Питулько В.М., Шумилов Ю.В., Сухорослов В.Л.* Особенности формирования вторичных ореолов рассеяния золото-серебряных месторождений в районах криолитозоны: (Материалы симпозиума "Методы геохимических поисков"). Острава, 1979, т. II, с. 150–153.
116. Платина Адданского щита /И.С. Рожков, В.И. Кицул, Л.В. Разин, С.С. Борщанская. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 117 с.
117. *Поздняков А.В.* Развитие склонов и некоторые закономерности формирования рельефа. М.: Наука, 1976. 104 с.
118. *Поликарпочкин В.В.* Вторичные ореолы и потоки рассеяния. Новосибирск: Наука, 1976. 408 с.
119. *Пстынов Б.Б.* Избр. труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 751 с.
120. *Поляницын А.В.* Об измельчении наносов под влиянием истирания. — Метеорология и гидрология, 1966, № 9, с. 38–40.
121. *Прокопчук Б.И.* Алмазные россыпи и методика их прогнозирования и поисков. М.: Недра, 1979. 248 с.
122. *Радкевич Е.А.* К вопросу о классификации оловородных месторождений. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1956, № 6, с. 58–59.
123. *Радкевич Е.А.* Очерки металлогении Тихоокеанского рудного пояса. М.: Наука, 1976. 95 с.
124. Размещение и условия формирования древних россыпей золота на Северо-Востоке СССР /И.Б. Флеров, П.О. Генкин, Ю.Е. Дорт-Гольц, А.Г. Беккер. — В кн.: Древние и погребенные россыпи СССР. Киев: Наук. думка, 1977, ч. 2, с. 127–133.
125. *Разумизин Н.В.* Использование экспериментальных методов для решения некоторых вопросов формирования россыпей. — В кн.: Геология россыпей. М.: Наука, 1965, с. 335–343.
126. *Разумизин Н.В.* Единый россыпеобразовательный процесс и географические закономерности его проявления. — Изв. Всес. геогр. о-ва, 1972, т. 104, № 6, с. 442–448.
127. *Разумизин Н.В.* К проблеме взаимоотношений между ведущими факторами россыпеобразования. — Вестн. ЛГУ, 1973, № 18, с. 123–132.
128. *Разумизин Н.В.* Основные палеогеографические этапы образования россыпей. — Изв. Всес. геогр. о-ва, 1973, т. 105, с. 458–462.
129. *Разумизин Н.В.* Использование палеоклиматических реконструкций для выявления основных районов распределения древних россыпей. — В кн.: Древние и погребенные россыпи СССР. Киев: Наук. думка, 1977, ч. 1, с. 21–27.
130. *Рамберг Г.* Термодинамика и кинетика петрогенезиса. — В кн.: Земная кора. М.: Изд-во иностр. лит., 1957, с. 447–466.
131. *Регель В.Р., Слущкер А.И.* Кинетическая природа прочности. — В кн.: Физика сегодня и завтра. М.: Наука, 1973, с. 115–160.
132. *Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород. М.: Недра, 1967. 288 с.

133. *Росляков Н.А.* Золото в зоне гипергенеза золоторудных месторождений Восточного Забайкалья. — В кн.: Золото и редкие элементы в геохимических процессах. Новосибирск, Наука, 1976, с. 113—131.
134. *Рубцов В.К.* О распределении по размерам осколков при различных механизмах и масштабах разрушения горных пород. — Тр. ЦНИГРИ, 1964, вып. 62, с. 207—211.
135. *Рухин Л.Б.* Основы общей палеогеографии. Л.: Гостоптехиздат, 1959. 557 с.
136. *Рухина Е.В., Чистяков В.Г.* О первичном распределении обломочного материала в терригенных породах. — В кн.: Ландшафтно-геохимические исследования. М.: Моск. фил. Геог. о-ва СССР, 1973, с. 9—13.
137. *Рыжов Б.В.* О чертах сходства в строении аллювиальных россыпей хрустала, касситерита и золота. — Тр. ЦНИГРИ, 1968, вып. 79, с. 320—324.
138. *Рыжов Б.В.* Динамические классы россыпей. — В кн.: Древние и погребенные россыпи СССР. Киев: Наук. думка, 1977, ч. 1, с. 44—54.
139. *Сауков А.А.* Геохимия. М.: Наука, 1975. 480 с.
140. *Сауков А.А.* Геохимические очерки. М.: Наука, 1976. 556 с.
141. *Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П.* Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. Л.: Недра, 1978. 216 с.
142. *Сигов А.П.* Оценка расстояния, пройденного галькой, по ее окатанности. — Бюл. Комис. по изучению четвертичного периода. М.: Изд-во АН СССР, 1947, № 9, с. 48—58.
143. *Сигов А.П.* Историческая преемственность россыпей. — В кн.: Геология россыпей. М.: Наука, 1965, с. 28—34.
144. *Симанович И.М.* Кварц песчаных пород. М.: Наука, 1978. 154 с.
145. *Симонов Ю.Г.* Региональные типы процессов выветривания и морфолитоге-неза. — В кн.: Региональные типы процессов выветривания. Чита, 1970, с. 3—12. (Зап. Забайк. фил. Геогр. о-ва СССР; Вып. 41).
146. *Синицын В.М.* Климат латерита и боксита. Л.: Недра, 1976. 152 с.
147. *Синюгина Е.Я., Волярович Г.П., Яблокова С.В.* О связи аллювиальных россыпей золота с коренными источниками. — В кн.: Геология, закономерности размещения и методы изучения месторождений золота. М., 1967, с. 170—187. (Тр. ЦНИГРИ; Вып. 76).
148. *Скрябин А.И.* Условия образования золотоносных россыпей и связь их с коренными источниками (на примере месторождений Тарыно-Эльгинской зоны Яно-Колымского пояса): Автореф. дис. .. канд. геол.-мин. наук. М., 1971. В надзаг.: Центр. горно-разв. ин-т (ЦНИГРИ). 25 с.
149. *Скрябин А.И.* Особенности горизонтальной зональности золоторудных узлов. Якутск: Кн. изд-во, 1978. 88 с.
150. *Смирнов В.И.* Закономерности распределения оруденения и методы поисков в Таласском Алатау. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1939, 119 с. (Тр. Моск. геол.-развед. ин-та им. Орджоникидзе).
151. *Смирнов В.И.* Геология полезных ископаемых. М.: Недра, 1976. 680 с.
152. *Смирнов С.С.* Зона окисления сульфидных месторождений. 3-е изд. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 331 с.
153. *Соболев А.П., Колесниченко П.П.* Мезозойские гранитоидные комплексы юга Яно-Колымской складчатой системы. М.: Наука, 1979. 180 с.
154. *Соколов Д.И.* Мысли об Уральских золотоносных россыпях. — Горный журн., 1826, кн. 12.
155. *Соколов Б.Н.* К вопросу изучения миграционных свойств полезных минералов аллювиальных россыпей. — В кн.: Транспортировка полезных ископаемых в россыпях. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975, с. 129—131.
156. Состояние и задачи советской литологии: (Доклады на пленарных заседаниях VIII Всес. литол. совещ. 28 мая — 2 июня 1968 г.). М.: Наука, 1970. Т. I. 252 с.

157. Справочник по климату СССР. Вып. 33. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. Ч. 2. 288 с.
158. Справочник (Кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1975. 277 с.
159. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. 1. 212 с.
160. *Страхов Н.М.* О некоторых вопросах геохимии кремнезема. — В кн.: Геохимия кремнезема. М.: Наука, 1966, с. 5–8.
161. *Страхов Н.М.* Развитие литогенетических идей в России и СССР: Критический обзор. М.: Наука, 1971. 609 с.
162. *Строна П.А.* Главные типы рудных формаций. Л.: Недра, 1978. 199 с.
163. *Суворов Б.И., Латышев О.Г.* Термодеформационные явления в горных породах. — Изв. вузов, Горный журн., 1974, № 10, с. 3–6.
164. *Суходровский В.Л.* Рельефообразование в перигляциальных условиях (на примере Земли Франца-Иосифа). М.: Наука, 1967, с. 119.
165. *Таусон Л.В.* Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих месторождений: (Материалы симп.: "Методы геохимических поисков"), Острава, 1979, т. I, с. 17–20.
166. *Травин Ю.А.* Зависимость продуктивности золотоносных долин от их порядка в некоторых районах Яно-Колымского пояса. — Колыма, 1966, № 4, с. 26–29.
167. *Трофимов В.С.* Гумидный тип литогенеза и связанные с ним россыпи полезных ископаемых. — В кн.: Генезис и литология континентальных антропогенных отложений. М.: Наука, 1965, с. 100–111.
168. *Трофимов В.С.* Закономерности размещения и образования алмазных месторождений. М.: Недра, 1967. 229 с.
169. *Трушков Ю.Н.* Условия формирования и закономерности распределения россыпей в мезозоидах Якутии. М.: Наука, 1971. 265 с.
170. *Трушков Ю.Н.* Определение местоположения коренного источника и опыт его реконструкции. — В кн.: Поиски и опыт реконструкции коренных источников золота по разведанным россыпям. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975, с. 50–67.
171. *Федоров Г.Ф.* Изучение кинематики волны попуска. — Тр. ЦНИИЭВТ, вып. 19. Речной транспорт. 1960.
172. *Федоров И.И.* Влияние неустановившегося движения воды на распределение осредненных скоростей по вертикали. — Тр. Гидрол. ин-та, Л., 1965, вып. 121.
173. Физико-географический атлас. М.: АН СССР и Главное управление геодезии и картографии ГК СССР, 1964. 298 с.
174. *Философов В.П.* Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 230 с.
175. *Финкель В.М.* Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970, с. 325–344.
176. *Фирсов Л.В.* Золото-кварцевая формация Яно-Колымского пояса: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 1974. В надзаг.: ИГ и ГСО АН СССР. 49 с.
177. *Фиск Х.Н., Мак-Фарлан Е.* (младший). Верхнечетвертичные дельтовые отложения реки Миссисипи (местная седиментация и тектоника бассейна). — В кн.: Земная кора. М.: Изд-во иностр. лит., 1957, с. 299–322.
178. *Хмелева Н.В., Григорьев Н.П.* Механизм транспорта тяжелых минералов в процессе формирования аллювиальных россыпей. — В кн.: Транспортировка полезных ископаемых в россыпях. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975, с. 15–16.
179. *Хрипков А.В.* Распределение золота в россыпях Северо-Востока и густота сети поисковой разведки. Магадан, 1958. 56 с.

180. *Чайка В.М.* Геологические условия формирования кор выветривания и их рудоносных фаций (россыпей). — В кн.: Типы рудоносных фаций. М.: Наука, 1977, с. 62–80.
181. *Чайка В.М.* Принципы разномасштабности в геологии и уровни познания (применительно к теории литогенеза). — В кн.: Проблемы осадочного рудообразования. М.: Наука, 1978, с. 3–11.
182. *Чайковский В.К.* Геология оловоносных месторождений Северо-Востока СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 336 с.
183. *Чалов Р.С.* Некоторые особенности руслового режима горных рек. — Метеорология и гидрология, 1968, № 4, с. 70–74.
184. *Чеботарев А.И.* Гидрология суши и расчеты речного стока. 2-е изд. Л.: Гидрометеоздат, 1953. с. 361.
185. *Чигир В.Г., Чигир Т.С.* Температурные условия морозного преобразования почв и горных пород в различных природных зонах СССР. — В кн.: Почвенный криогенез: (К 10-му Междунар. конгр. почвоведов, Москва, 1974). М.: Наука, 1974, с. 134–140.
186. *Чистяков А.А.* Аллювий горных и подгорно-равнинных рек (закономерности формирования и фации на примере рек Кавказа, Средней и Южной Азии): Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 1975. В надзаг.: МГУ. 51 с.
187. *Шамов Г.И.* Речные наносы. Л.: Гидрометеоздат, 1959. 374 с.
188. *Шанцер Е.В.* Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит. — Тр. ГИН АН СССР. Сер. геол., 1951, вып. 136, № 55. 271 с.
189. *Шанцер Е.В.* О генетических типах континентальных отложений и генетических типах россыпей. — В кн.: Геология россыпей. М.: Наука, 1965, с. 14–28.
190. *Шанцер Е.В.* Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований. М.: Наука, 1966. 229 с.
191. *Шаскольская М.Л.* Кристаллография. М.: Высшая школа, 1976. 383 с.
192. *Шателье А.* Кремнезем и силикаты. Л.: Научное химико-техническое изд-во управления ВСНХ, 1929. 420 с.
193. *Шахов Ф.Н.* Геология жильных месторождений. М.: Наука, 1964. 244 с.
194. *Шатыров В.Г., Шужилов Ю.В.* Суффозионно-остаточные россыпи — новый генетический тип россыпей золота. — ДАН СССР, 1979, т. 246, № 6, с. 1444–1447.
195. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1978. 287 с.
196. *Шило Н.А.* Особенности образования россыпей в зоне развития вечной мерзлоты. — Сов. геология, 1956, № 53, с. 63–75.
197. *Шило Н.А.* Четвертичные отложения Яно-Колымского золотоносного пояса, условия и этапы их формирования. — Тр. ВФНИИ-1, геология. Магадан, 1961, вып. 66. 108 с.
198. *Шило Н.А.* Некоторые черты вещественного состава аллювиальных россыпей Яно-Колымского золотоносного пояса. — Тр. Сев.-Вост. КНИИ, 1963, вып. 3, с. 87–107.
199. *Шило Н.А.* Разработка геологии россыпей — важная задача науки. Колыма, 1964, № 3, с. 22–26.
200. *Шило Н.А.* Тектоно-геоморфологическая эволюция поверхности Северо-Востока и россыпеобразование. — Тр. Сев.-Вост. КНИИ ДВНЦ АН СССР, 1967, вып. 30, с. 146–154.
201. *Шило Н.А.* Россыпеобразующие рудные формации и связь с ними россыпей. — В кн.: Проблемы геологии россыпей. Магадан, 1970, с. 13–24.
202. *Шило Н.А.* Золоторудные месторождения метаморфогенной, плутоногенной и вулканогенной формаций. — В кн.: Геолого-геохимические особенности

- месторождений полезных ископаемых на Северо-Востоке СССР. Магадан, 1976, с. 3–41. (Тр. Сев.-Вост. КНИИ; Вып. 69).
203. Шило Н.А., Павлов Г.Ф. Главнейшие черты россыпной оловоносности Северо-Востока СССР. — В кн.: Геология россыпей. М.: Наука, 1965, с. 53–67.
  204. Шило Н.А., Желнин С.Г., Шумилов Ю.В. Экспериментальные данные о потере веса и изменении формы частиц золота в водно-аллювиальной среде. — В кн.: Тез. докл. на Всесоюз. симпозиум "Минералогия и геохимия золота". Владивосток, 1974, с. 160–162.
  205. Шило Н.А., Шумилов Ю.В. О динамике и постседиментационном преобразовании аллювия в субполярных условиях. — Геология и геофизика, 1969, № 6, с. 3–11.
  206. Шило Н.А., Шумилов Ю.В. Особенности литологии континентальных отложений Северо-Востока СССР. — В кн.: Состояние и задачи советской литологии. М.: Наука, 1970а, т. 2, с. 199–207.
  207. Шило Н.А., Шумилов Ю.В. Новые экспериментальные данные о поведении частиц золота в водной среде. — ДАН СССР, 1970б, т. 195, № 1, с. 193–196.
  208. Шило Н.А., Шумилов Ю.В. Механизм поведения золота в процессах формирования россыпей Северо-Востока СССР. — В кн.: Минеральные месторождения. Междунар. геол. конгр., 25-я сессия. М.: Наука, 1976, с. 156–168.
  209. Шульц С.С. Анализ новейшей тектоники и рельефа Тянь-Шаня. М.: Географиздат, 1948. 159 с.
  210. Шумилов Ю.В. Геолого-аналитический метод в геологии россыпей. Проблемы геологии россыпей: тез. докл. III Всесоюз. совещ. по геологии россыпей. Магадан, 1969, с. 176–178.
  211. Шумилов Ю.В. О выделении элювиально-аллювиального типа россыпей. — Колыма, 1970, № 11, с. 40–41.
  212. Шумилов Ю.В. К вопросу о количественной оценке процессов россыпеобразования. — В кн.: Проблемы геологии россыпей. Магадан, 1970, с. 125–133.
  213. Шумилов Ю.В. Тектоно-геоморфологические и литогенетические закономерности формирования аллювиальных месторождений золота Северо-Восточного Приколымья: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1971. В надзаг.: МГУ. 25 с.
  214. Шумилов Ю.В. Эффект индифференциации осадка как специфическая особенность литогенеза перигляциального типа. — Тр. Сев.-Вост. КНИИ ДВНЦ АН СССР, 1971, вып. 38, с. 187–194.
  215. Шумилов Ю.В. Механизм концентрации золота при формировании аллювиальных россыпей. — Тр. Сев.-Вост. КНИИ ДВНЦ АН СССР, 1976а, вып. 69, с. 209–213.
  216. Шумилов Ю.В. Физико-географическая среда и современные геологические процессы на Северо-Востоке СССР. — В кн.: Природные ресурсы Северо-Востока СССР. Владивосток, 1976б, с. 46–54.
  217. Шумилов Ю.В., Воронцов В.Н., Шевченко И.С. Устройство для изучения процесса транспортировки минералов водным потоком. Авт. св. № 594477. Оф. бюл. "Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки" Госкомизобретений при СМ СССР, 1978, № 7, с. 178.
  218. Шумилов Ю.В., Шумовский А.Г. Экспериментальные данные о гидравлической крупности некоторых шлиховых минералов Северо-Востока СССР. — ДАН СССР, 1975, т. 235, № 5, с. 1174–1176.
  219. Шумилов Ю.В., Шумовский А.Г., Воронцов В.Н. Моделирование процесса эрозии глинистых отложений струйчатыми потоками. — В кн.: Закономерности проявления эрозионных процессов в различных природных условиях. М.: Изд-во МГУ, 1976, с. 378–379.

220. Щербаков Ю.Ф. Распределение и условия концентрации золота в рудных провинциях. М.: Наука, 1967, с. 248–267.
221. Эндогенный минеральный комплекс оловорудных месторождений Северо-Востока / А.В. Зильберминц, П.П. Колесниченко, А.Н. Лабутин, В.А. Приставко. — Тр. Сев.-Вост. КНИИ ДВНЦ АН СССР, 1973, вып. 48, с. 46–159.
222. Яхонтова Л.В., Грудев А.П. Зона гипергенеза рудных месторождений. М.: Изд-во МГУ, 1978. 229 с.
223. Baillie J.C. Piping as an erosion process in the uplands of Sarawak. — J. Trop. Geogr., 1975, vol. 41, p. 9–15.
224. Brooks A.H., Richardson G.B., Collier A.J. A reconnaissance of Cape Nome and adjacent gold fields of Seward Peninsula, Alaska in 1900. — A special publication entitled — "Reconnaissance in the Cape and Norton Bay regions, Alaska in 1900", 1901. 180 p.
225. Cheney E.S., Patton T.C. Origin of bedrock values of placer deposits. — Econ. geology and Bull. Soc. Econ. Geologists. vol. 62, N 6, 1967.
226. Dunn E.J. Geology of gold (South Africa, Australia, New Zealand), London, 1929.
227. Fyfe W.S. Conditions for deep fluid penetration and metal extraction in the crust. — Abstr. Symposium "Methods of Geochemical prospecting (MGP)". Vol. I. Ostrava, Prague, Czechoslovakia, 1979, p. 43.
228. Gold placer of parts of Seward Peninsula, Alaska / Collier A.J., Hess F.L., Brooks A.H. — Bull. U.S. geological survey, 1908, N 328.
229. Journaux A., Coutard J.P. Etude en simulation de l'action du gel sur des grands modèles de sols. — Bull. Cent. géomorphol. Caen. CNRS, 1972, N 13–15, 35–59. Discuss., 60–62.
230. Lourence L.A. Slow movement of earth under tropical rain forest conditions. — Geology, 1974, vol. 2, N 1, p. 9–10.
231. Lourence L.A. Slow slope movement in the dry tropics: La Pag era, Puerto Rico. — Geomorphol., 1975, vol. 19, N 3, p. 333–339.
232. Raeburn C., Milner H.B., Alluvial Prospecting. The Technical Investigation of Econ. Alluvial Miner., London, 1927.
233. Rubey W.W. Settling velocities of gravel, sand and silt particles. — Amer. J. Sci. 5th Ser., 1933, vol. 25, N 148.
234. Scheidegger A.E. Theoretical Geomorphology. Berlin, 1961.
235. Schumm S.A., Stevens M.A. Abrasion in place: a mechanism for rounding and size reduction of coarse sediments in rivers. — Geology, 1973, vol. 1, N 1, p. 37–40.
236. Slingerland R.L. The effects of entrainment on the hydraulic equivalence relationships of light and heavy minerals in sands. — J. Sediment. Petrol., 1977, vol. 17, N 2, p. 753–770.
237. Tourtelot H.A. Hydraulic equivalence of grains of Quartz and heavier minerals, and implications for study of placer. — Geol. Surv. profess. Pap., 1968, N 594–F. 13 p.
238. Tuck R. Origin of the bedrock values of placer deposits. — Econ. Geol. and Bull. Soc. Econ. Geologists, 1968, vol. 63, N 2.
239. Yeend Warren. Experimental abrasion of detrital gold. — J. Res. U.S. Geol. Surv., 1975, vol. 3, N 2, p. 203–212.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
Глава I	
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ . . . . .	7
Этапы и направления исследований в геологии россыпей . . . . .	7
Литогенетические проблемы россыпеобразования . . . . .	12
Глава II	
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ РУД . . . . .	24
Россыпеобразующие рудные формации золота, платины, олова и алмазов . . . . .	25
Факторы выветривания руд и горных пород . . . . .	54
Физическое выветривание руд и горных пород . . . . .	70
Химическое выветривание руд и горных пород . . . . .	96
Пути решения проблемы выветривания в геологии россыпей . . . . .	125
Глава III	
ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РОССЫПЕЙ . . . . .	140
Общие положения . . . . .	140
Основные черты элювиально-делювиального процесса . . . . .	142
Литогенетические особенности аллювиального процесса . . . . .	144
Поведение рудного вещества в водно-аллювиальной среде . . . . .	155
Механизмы поведения минералов и условия концентрации в водно-аллювиальной среде . . . . .	176
Концентрация и рассеяние минералов в геологии россыпей . . . . .	185
Глава IV	
КОНТИНЕНТАЛЬНЫЙ ЛИТОГЕНЕЗ И РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЕ . . . . .	187
Тектоно-геоморфологическая эволюция россыпеобразующих формаций . . . . .	187
Гранулометрическая и минералогическая эволюция терригенного материала в связи с процессами россыпеобразования . . . . .	212
Зональность литогенетических факторов и размещение россыпных месторождений . . . . .	222
Глава V	
ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПОИСКОВ РОССЫПЕЙ . . . . .	225
Россыпеобразующее значение различных формаций . . . . .	225
Критерии эродированности коренных источников . . . . .	236
Палеогеографические факторы образования россыпей и критерии прогнозирования . . . . .	240
Критерии выявления дельтовых россыпей . . . . .	250
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	254
ЛИТЕРАТУРА . . . . .	259

Юрий Васильевич Шумилов

**Физико-химические  
и литогенетические факторы  
россыпеобразования**

*Утверждено к печати  
Северо-Восточным комплексным  
научно-исследовательским институтом  
ДВНЦ АН СССР*

Редактор издательства *И.А. Клинцева*  
Художник *В.Ф. Найденко*  
Художественный редактор *Т.И. Алексеева*  
Технический редактор *Г.И. Астахова*  
Корректор *Г.И. Сурова*

ИБ № 21457

Подписано к печати 15.10.81. Т – 24046  
Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная № 1  
Печать офсетная. Усл.печ.л. 17,0  
Уч.-изд.л. 19,8. Тираж 850 экз.  
Тип. зак. 757. Цена 3руб.

Издательство "Наука", 117864 ГСП-7,  
Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90  
Ордена Трудового Красного Знамени  
1-я типография издательства "Наука",  
199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

---

**В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ " НАУКА "**

**выходят книги**

**А.В. Чичагов, Л.В. Сипавина**

**Рентгенометрические параметры твердых растворов  
Справочник**

Справочник содержит результаты исследований (за последние 20 лет) концентрационных зависимостей рентгенометрических параметров для минералов переменного состава и их синтетических аналогов по данным порошковой рентгенометрии с описанием условий синтеза, методов определения рентгенометрических параметров и иллюстрацией зависимостей табличными, графическими и аналитическими данными.

**Очерки физико-химической петрологии, вып. X**

Работа посвящена общим вопросам экспериментального исследования эндогенных процессов: экспериментальным и расчетным исследованиям минеральных и газовых равновесий, распределению компонентов в твердых растворах, растворимости минералов в гидротермальных системах, вязкости магматических расплавов, петрологическим аспектам гранитизации и щелочных магм и другим вопросам.

*Книги можно предварительно заказать в магазинах Центральной конторы "Академкнига", в местных магазинах книготоргов или потребительской кооперации без ограничений.*

---

3 руб.

3684

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»