

ЧАСТЬ 1

ОСНОВЫ ЛИТОГЕНЕЗА

1.1. Общие сведения о процессах осадко- и породообразования

Осадочной породой называется геологическое тело, возникшее из продуктов физического и химического разрушения литосферы, в результате химического осаждения и жизнедеятельности организмов или того и другого одновременно [8]. Осадочные породы представляют собой скопления минерального или органического вещества, образующиеся в условиях земной поверхности (на дне водоемов или на поверхности суши) как результат действия экзогенных процессов.

Основными компонентами осадочных пород являются:

- обломочная часть – продукты механического раздробления горных пород различного генезиса;
- хемогенная часть – продукты химических реакций, происходивших, главным образом, в водной среде;
- биогенная часть – остатки животных и растительных организмов в виде минеральных скелетных остатков или неполностью разложившихся органических тканей;
- вулканогенная часть – продукты вулканической деятельности;
- коллоидный материал – тонкодисперсные частицы величиной 1–100 мкм (1×10^{-6} – 1×10^{-4} мм), образовавшиеся при тончайшем раздроблении обломочного материала;
- космическая часть – космическая пыль, метеориты.
- Значительный объем в осадочных породах часто составляют пустоты различного размера, заполненные жидкостями или газами.

В самом общем виде процесс образования осадочных пород можно представить в виде схемы: возникновение исходных продуктов; перенос и частичное осаждение осадочного материала на путях переноса; осаждение осадочного вещества в водных бассейнах; преобразование осадков и превращение их в осадочные породы.

Таким образом, возникновение и изменение осадочных пород представляет собой ряд последовательных и закономерных процессов, которые включают в себя комплекс механических (физических), химических и биологических превращений.

Процесс породообразования носит название **литогенеза**. Основные положения теории литогенеза изложены в трудах выдающегося ученого, академика Н.М. Страхова [45].

Согласно его представлениям, в цикле процессов образования осадочных пород выделяется ряд стадий:

гипергенез – возникновение исходных продуктов для образования осадочных пород (результаты механического разрушения, химического разложения более древних пород, жизнедеятельности организмов, вулканической деятельности);

седиментогенез – перенос и осаждение вещества;

диагенез – совокупность процессов преобразования рыхлых осадков в осадочные породы в верхней зоне земной коры.

Условия осадкообразования определяются климатом, рельефом и геотектоническим режимом территории. Из этих трех факторов наибольшее значение имеет климат. По климатическому признаку Н.М. Страхов выделил следующие типы литогенеза:

- *гумидный* – с климатом влажных зон, с положительными температурами большую часть года, с превышением количества осадков над испарением;
- *аридный* – с климатом пустынь и полупустынь, с дефицитом влаги;
- *нивальный*, или ледовый – с климатом полярных и высокогорных областей.

По источнику исходного вещества Н.М. Страхов выделил четвёртый тип литогенеза – *эффузивно-осадочный*, связанный с областями прошлой и современной вулканической деятельности.

Климатические, т.е. зональные типы литогенеза (гумидный, аридный и нивальный) установлены на суше и в водоёмах суши – озёрах, внутренних морях, а также в окраинных морях океана. Азональный (вулканогенно-осадочный) тип литогенеза характерен как для суши, так и для океана. Вообще же, для океана характерен свой, особый, тип литогенеза, который Н.М. Страхов противопоставил типам литогенеза на суше. Специфика океанского литогенеза связана с огромными масштабами океанических бассейнов, высокой дифференциацией вещества по размеру частиц, накоплением основной массы осадочного вещества в гидродинамически активной зоне течений, малой чувствительностью литогенеза к климату.

В настоящее время ряд ученых – литологов (Н.Б. Вассоевич, Н.В. Логвиненко, О.В. Япаскерт, В.П. Алексеев и др.) в понятие литогенеза включают и стадии преобразования осадочных пород [12, 8, 10, 14, 1]:

катагенез – стадия химико-минералогического преобразования осадочных пород при погружении их в более глубокие горизонты литосферы;

метагенез – стадия глубокой переработки осадочных пород в условиях повышающихся давления и температуры и предшествующая метаморфизму.

Продолжительность процесса породообразования зависит от состава осадочного материала и может достигать сотен тысяч лет. Наступающая затем стадия существования породы может продолжаться сотни миллионов лет. Завершается эта стадия разрушением осадочной породы в случае выхода её на поверхность или превращением её в метаморфическую в случае глубокого погружения (рис. 1).

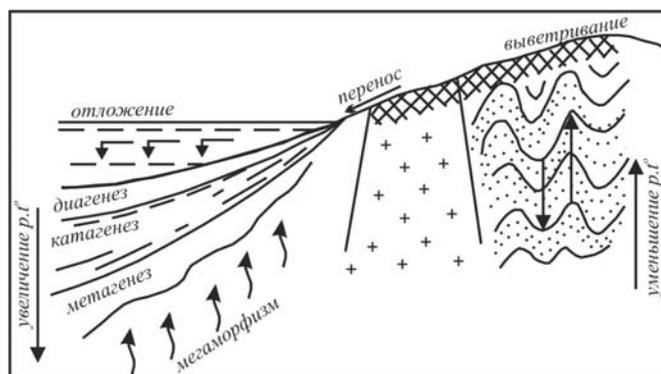


Рис. 1. Схема этапов образования и преобразования осадочных пород, по Р.С. Безбородову, 1989 [3]

1.2. Стадия гипергенеза

Стадия гипергенеза представляет собой первый (подготовительный) этап образования осадочных пород. Гипергенез (выветривание) – разрушение материнских пород на поверхности Земли и в её приповерхностной зоне. В зависимости от того, какие факторы воздействия на породы являются главными, различают физическое и химическое выветривание.

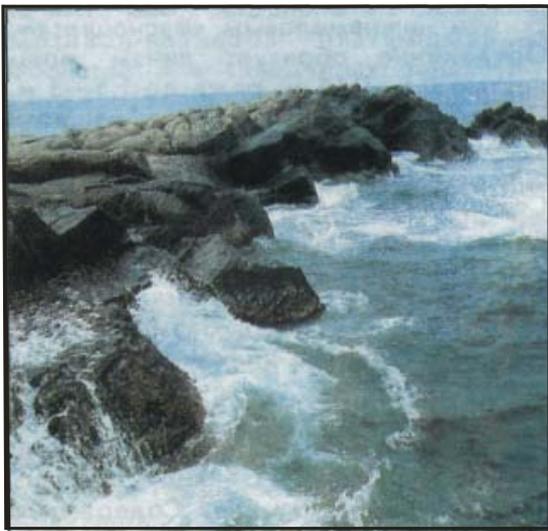
Физическое выветривание выражается в механическом разрушении минералов и горных пород при изменении температуры, ударах и истирании.

Благодаря разным тепловым свойствам и анизотропии минералов, колебания температуры вызывает изменение объема минералов и ослабление связей между ними. В результате этого в породе появляются мелкие трещинки, в них попадает вода, которая, замерзая, расширяет их. Горная порода становится трещиноватой и разделяется на части или обломки. Обломки, отделяясь от общей массы породы, сосредотачиваются на разрушаемой поверхности и при малейших сотрясениях или под влиянием силы тяжести падают к подножью склонов, разбиваясь на более мелкие частицы (рис. 2). Продукты выветривания на склонах называются *делювием*, а у подножья склонов – *коллювием*.



*Рис. 2 Конусы осыпания, образующиеся в результате выветривания.
Горный Алтай. Фото А.В. Осипова*

Большую работу производят текущие воды и волны прибоя, разрушающие прибрежные коренные породы (рис. 3).



а



б

*Рис. 3. Разрушающее действие прибоя на прибрежные породы:
а) Восточное побережье Каспийского моря [60, т. 5];
б) побережье Австралии [87]*

Этот процесс, называемый *абразией*, приводит к образованию отдельных останцов, состоящих из наиболее крепких пород (рис. 4).

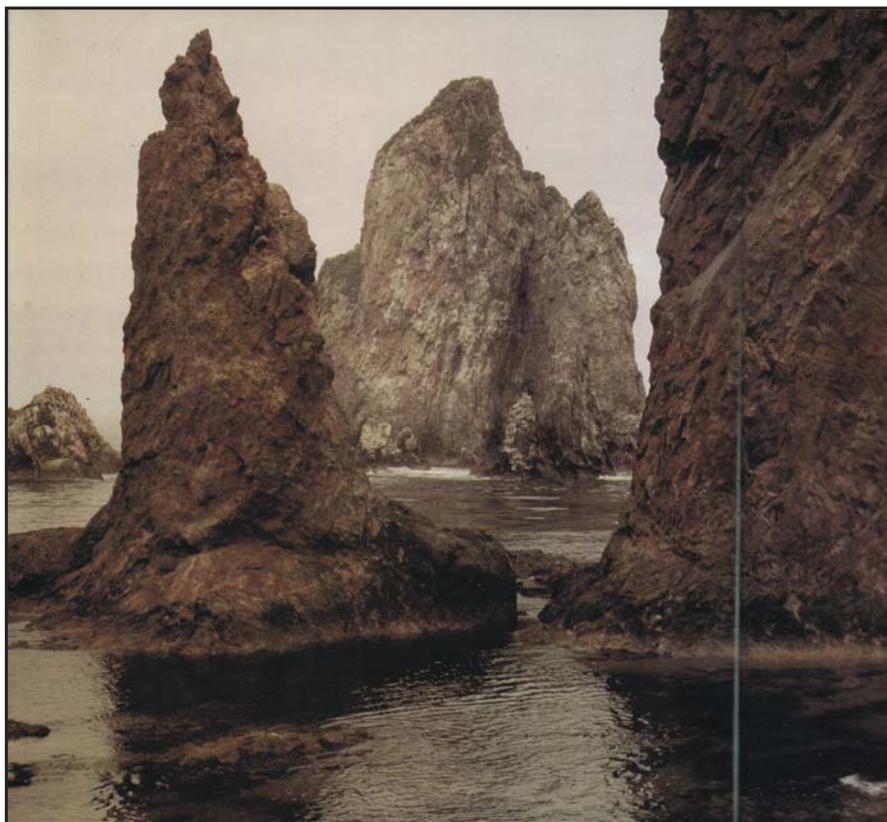


Рис. 4. Группа абразионных островов. Камчатка [94]

Движущиеся ледники сглаживают свое ложе, механически раздробляя горные породы (рис. 5) и оставляя глубокие борозды на крупных глыбах (рис. 6).



Рис. 5. Валунное поле, образованное при механическом дроблении коренных пород движущимся ледником. Эстония [60, т. 5]

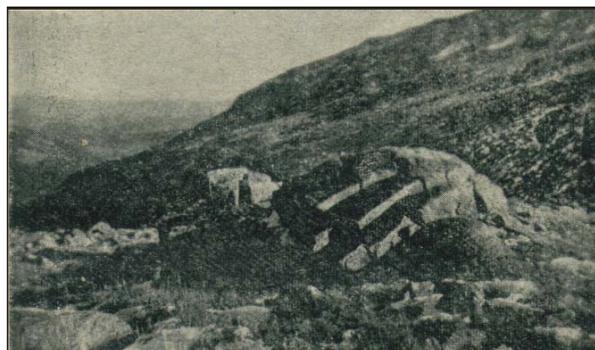
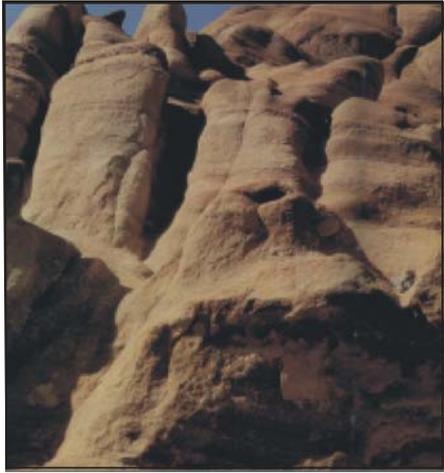


Рис. 6. Бараний Лоб с ледниковыми шрамами, по А.М. Горбачеву, 1973[24]

Деятельность ветра вызывает явления *дефляции* (выдувания, развевания частиц) и *корразии* (обработки горных пород переносимыми ветром обломками). В результате образуются разнообразные причудливые формы эолового рельефа (рис. 7) и останцы выветривания (рис. 8).



а

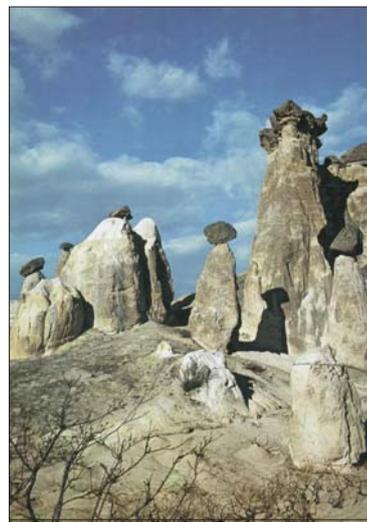


б

*Рис. 7. Формы золотого рельефа:
а) Камчатка [94]; б) Якутия [87]*



а



б

*Рис. 8. Останцы выветривания:
а) Хабаровский край [60, т. 1]; б) Турция [80]*



Органическая жизнь механически разрушает горные породы различными путями. Корневая система растений действует так же, как и замерзающая вода: корни, увеличиваясь в объеме в процессе роста, развивают в трещинах давление и разрывают породу (рис. 9).

Рис. 9. Участие растений в процессах физического выветривания. Кавказ, берег р. Куры, по А.М. Горбачеву, 1973 [24]

Физическое выветривание приводит к образованию обломков пород и минералов различной величины – от крупных глыб диаметром в несколько метров до тонких частиц размером менее 0,005 мм (рис. 10).



Рис. 10. Продукты физического выветривания. Казахстан.
Фото Т.Г. Перевертайло

Продукты механического раздробления в виде обломков различной формы и размера, а также коллоидные частицы представляют собой уже готовый осадочный материал.

Химическое выветривание играет большую роль при образовании осадочного материала. Основными действующими силами этого процесса являются вода, кислород, углекислый газ, а также гуминовые и минеральные кислоты.

1. Вода является главным фактором химического выветривания, благодаря своим физико-химическим свойствам.

- Вода – растворитель многих природных минеральных и органических соединений. Её растворяющая способность определяется полярной природой молекул воды. Атомы водорода и кислорода в молекуле воды соединяются с помощью ковалентной асимметричной связи (рис. 11). При этом атом кислорода «оттягивает» к себе большую часть электронного облака. Это даёт сильно электроотрицательному атому кислорода дополнительный отрицательный заряд за счёт присоединения электронов атомов водорода. Последние приобретают положительный заряд. Таким образом, молекулы воды обладают полюсами и являются электрическими диполями, т.е. обладают полярностью. Эта полярная природа молекул и обуславливает эффективную растворяющую способность воды по отношению к веществам с ионным типом связи (рис. 12).

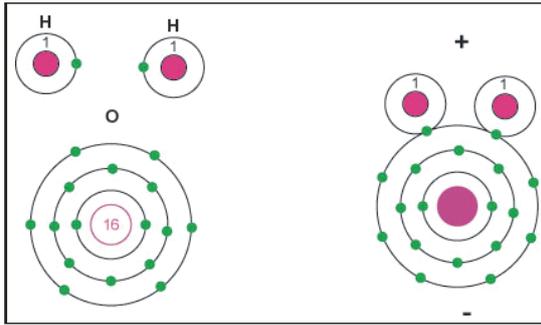


Рис. 11. Образование полярной молекулы воды посредством ковалентных связей

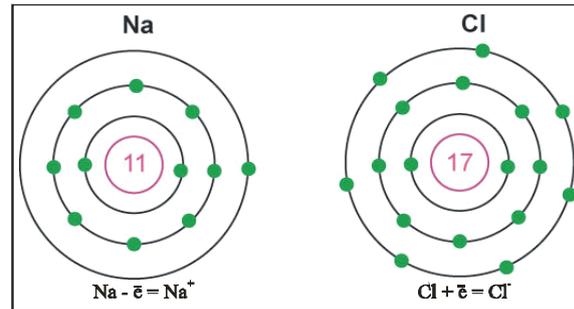


Рис. 12. Ионный тип связей

Положительные и отрицательные концы диполей молекул воды присоединяются, соответственно, к отрицательным и положительным ионам вещества, нейтрализуя их заряды, в связи с чем происходит отрыв атомов, способствующий растворению вещества.

- Молекулы воды ориентируются относительно друг друга посредством водородных связей. С их помощью образуются тетраэдрические группы из четырёх молекул. Такие группировки молекул воды обуславливают её способность проникать по тончайшим капиллярам в породу.
- Вода – слабый электролит, диссоциирующий на ионы H^+ и OH^- при любых температурах, однако, обычно степень диссоциации очень мала. При комнатной температуре в 1 литре дистиллированной воды содержится лишь 10^{-7} молей ионов водорода и столько же ионов гидроксила. Содержание ионов H^+ определяет меру кислотности воды. Кислотность принято выражать в виде отрицательного логарифма концентрации ионов H^+ , выраженной в граммах на литр. Его называют величиной pH.

При $\text{pH} = 7$ реакция воды нейтральная

$\text{pH} > 7$ – щелочная

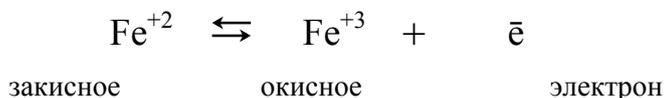
$\text{pH} < 7$ – кислая

- В водных растворах многие вещества вступают с водой в реакцию обменного разложения, называемого гидролизом, когда небольшие сильно заряженные ионы H^+ замещают катионы металлов в кристаллических решётках, а ионы OH^- могут соединяться с замещёнными катионами.

2. Вторым важным фактором химического выветривания является кислород.

Воздействие кислорода на минералы называется **окислением**. В случае отсутствия кислорода, например, в сероводородной среде, происходит **восстановление** вещества.

Окисление влечёт за собой потерю электронов элементами или ионами и приводит к увеличению их положительного заряда или к уменьшению отрицательного. При восстановлении наблюдается обратная картина. Например, в обратимой реакции Fe закисное может окисляться с потерей электрона:



В поверхностных водах наиболее важным природным окисляющим агентом является растворённый кислород, вследствие его очень высокой электроотрицательности (шесть электронов на внешней орбите).

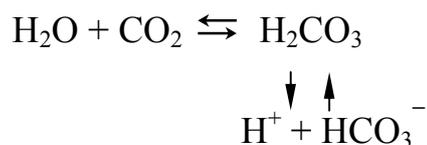
Мерой окисления или восстановления вещества является окислительно-восстановительный потенциал Eh, измеряемый в милливольтгах. При положительных значениях Eh – среда окислительная, при отрицательных – восстановительная. Чем выше абсолютная величина Eh, тем выше степень окисления или восстановления.

Большинство элементов в зоне выветривания и в верхних частях отложенных осадков окисляется. Исключения наблюдаются в бедных кислородом заболоченных почвах, в которых в большом количестве присутствуют анаэробные бактерии. Это организмы, развивающиеся в отсутствие свободного кислорода. Области их развития – придонные участки морских и континентальных водоёмов, лишённые доступа свободного кислорода (например, глубоководные илы Чёрного моря, лиманы, солончатые озёра, болота).

В практике литологических исследований обстановка считается окислительной, если породы имеют бурую, красную, оранжевую окраску или оттенок. Эти цвета обусловлены наличием окисного железа (Fe^{+3}). Серый, чёрный, зеленовато- и голубовато-серый цвет связан с наличием в породах закисного железа (Fe^{+2}), а также присутствием тонкодисперсного органического вещества. Эти цвета являются признаком восстановительной обстановки.

3. Третьим важным фактором химического выветривания является углекислый газ, растворённый в воде, или углекислота.

Свободный углекислый газ, соединяясь с водой, образует угольную кислоту, которая при диссоциации резко повышает кислотность среды в ходе реакции:



Источником углекислоты является жизнедеятельность организмов, разложение органических остатков и карбонатов, а также вулканическая деятельность. Особенно много углекислоты в болотных водах и торфяниках.

4. *Четвёртым агентом химического выветривания является работа гуминовых кислот*, образующихся при разложении органических веществ, в основном животного происхождения. Особенно велика их роль во влажных заболоченных районах с умеренным и жарким климатом.

5. *Пятый фактор химического выветривания проявляется в районах активной вулканической деятельности*. Из недр Земли поступают газы: хлор (Cl), фтор (F), серный ангидрит (SO₃), сернистый ангидрит (SO₂) и др. Они вступают в реакцию с водяными парами и образуют минеральные кислоты, способные разлагать минералы и горные породы.

Таким образом, химическое выветривание приводит к изменению минералов глубинных зон Земли, превращению их в минералы, устойчивые на земной поверхности. Происходит изменение сложных соединений, превращение их в более простые.

Биологическое выветривание сводится к механическому и химическому изменению пород, вызываемому жизнедеятельностью организмов. Биологические факторы играют важную роль в своеобразном типе выветривания – почвообразовании.

Минералы имеют разную **устойчивость** к внешним воздействиям, зависящую от их состава и свойств. Различают механическую и химическую устойчивость. Они взаимно связаны и влияют друг на друга.

Механическая устойчивость зависит от твёрдости, спайности и других физических свойств, а также от степени выветрелости минерала. *Химическая* устойчивость минералов зависит от состава, строения и степени дисперсности минералов, а также от характера среды и времени пребывания минералов в этой среде.

Прямым показателем устойчивости минералов является способность выветриваться (или, наоборот, противостоять выветриванию). При сравнении содержания минералов в породах и продуктах их выветривания установлено, что наименее устойчивыми к выветриванию являются минералы с высокими начальными температурами их образования. К ним относятся оливин, пироксены, амфиболы, плагиоклазы, биотит. Устойчивыми минералами являются кварц, калиевые полевые шпаты, циркон, гидроксиды железа, мусковит.

Большую роль при выветривании минералов играет фактор дисперсности. Так, полевые шпаты, устойчивые к воде и соляной кислоте, измельчённые в порошок (диаметр менее 0,002 мм), заметно растворяются в воде и почти полностью растворяются в соляной кислоте.

Одним из показателей химической устойчивости минералов является их растворимость в воде. При повышении давления и температуры растворимость минералов в воде, как правило, возрастает. Ещё более интенсивно минералы растворяются в кислотах. Природные воды часто содержат растворы различных кислот – угольной, серной, гуминовой и др. И, хотя эти растворы обычно имеют малую концентрацию, наличие их является важным фактором химического выветривания.

Таким образом, способность минералов по-разному противостоять внешним воздействиям приводит к тому, что в процессе выветривания происходит концентрация устойчивых минералов и уменьшение содержания (вплоть до полного исчезновения) неустойчивых минералов в продуктах выветривания.

В неоднородных по минералогическому составу породах в процессе выветривания происходит выщелачивание легкорастворимых минералов и образование пустот, т.е. проявляется избирательный характер выветривания (рис. 13).



Рис. 13. Избирательный характер выветривания в толще глинисто-карбонатных сланцев. Казахстан.

Фото Т.Г. Перевертайло

Продукты выветривания по отношению к коренным породам делятся на остаточные – оставшиеся на месте разрушения, и перемещенные – унесенные с мест разрушения в результате действия силы тяжести, атмосферных осадков и др.

Горная порода, подвергшаяся процессам выветривания и оставшаяся на месте своего первоначального залегания, называется *элювием*. По свойствам и внешнему виду элювий резко отличается от материнской породы, из которой он образовался. Это рыхлые образования, которые прослеживаются на глубине от нескольких миллиметров до де-

сятков метров. Мощность элювия обусловлена рядом факторов, главными из которых являются прочность пород, подвергшихся процессам выветривания, и интенсивность этих процессов.

В дальнейшем отдельные обломки горных пород, слагающих элювий, могут скатываться по склонам к их основанию. Часть их задерживается на склонах. Перемещение продуктов выветривания происходит под действием силы тяжести, дождевых потоков, талых вод. Формируется *делювий* и *коллювий* (рис. 14).

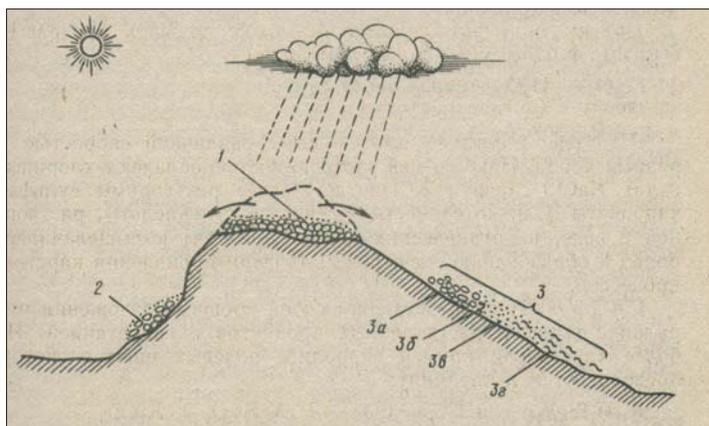


Рис. 14. Схема образования элювия (1), коллювия (2) и делювия (3), по В.С. Мильничуку и М.С. Арабаджи, 1989 [35]:
3а – щебень; 3б – дресва;
3в – супесь; 3г – суглинок

Совокупность продуктов разрушения, как остаточных, так и перемещенных, называется *корой выветривания*. Она развивается на различных по составу и происхождению горных породах. В зависимости от рельефа местности, состава пород и климатических условий мощность коры выветривания меняется от нескольких сантиметров до ста и более метров. Различный химический и минералогический состав коры выветривания, обусловленный неодинаковым составом выветриваемых горных пород и условиями выветривания, позволяет выделить несколько типов коры выветривания. Пример коры выветривания в районах с тропическим климатом показан на рис. 15.

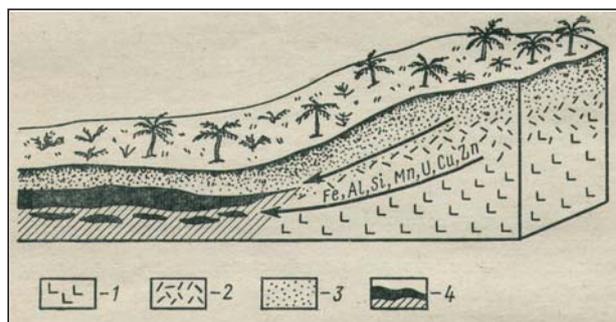


Рис. 15. Схематический разрез тропической коры выветривания [24]:

- 1 – коренные (материнские) породы;
- 2 – слабо измененные породы;
- 3 – продукты глубокого преобразования;
- 4 – переотложенные продукты выветривания

Образование коры выветривания, помимо климата и ландшафта, определяется характером тектонических движений. В областях устой-

чивого опускания происходит накопление осадков, поэтому кора выветривания не образуется. В районах быстрого поднятия и сильно расчленённого рельефа формированию коры выветривания препятствует энергичная денудация. Наиболее благоприятным режимом тектонических движений для образования мощной коры выветривания является медленное поднятие или стабильное положение территории.

Таким образом, в процессе выветривания образуются:

- обломочный материал;
- новые устойчивые в условиях поверхности Земли минералы;
- коллоидные и истинные растворы.

1.3. Стадия седиментогенеза

Вслед за выветриванием и одновременно с ним происходит перенос и осаждение вещества, т.е. образование осадков. Характер процессов осадкообразования, их направление и интенсивность определяются геологическими и физико-географическими условиями – рельефом и климатом. В связи с этим в разных климатических зонах осадкообразование проявляется по-разному.

1.3.1. Осадкообразование в областях с гумидным климатом

Главными агентами переноса и осаждения обломочного материала являются текущие воды, второстепенными – ветер, сила тяжести и деятельность организмов.

Перенос и отложение дождевыми и талыми водами. Продукты выветривания, накапливающиеся на склонах гор и возвышенностей, перемещаются дождевыми и талыми водами по мере возникновения этих потоков и на небольшие расстояния. В связи с этим обломочные частицы слабо окатаны и плохо отсортированы. Они находятся то в воздухе, то в воде. В результате образуются *делювиальные* (склоновые) и *пролювиальные* (у подножья склонов) осадки.

Эти отложения характеризуются своеобразной потоковой слоистостью, т.е. чередованием косых однонаправленных и горизонтальных серий слоёв. Косые, крутонаклонённые серии грубого материала – результат действия временного потока, а горизонтальные серии, сложенные более тонким материалом – осадки временных водоёмов.

В горах проливные дожди или быстрое таяние снега приводят к образованию бурных потоков – селей. Эти грязевые потоки стремительно переносят и отлагают огромное количество обломочного материала