

## Углеобразование

Уголь – твердая горная порода черного или бурого цвета, образованная из отмершей растительности. Уголь всегда содержит примеси других минералов и горных пород, содержание которых варьирует от долей процента до половины и более – то есть сам уголь иногда становится примесью в других породах.

**Состав и свойства углей определяется видовым составом растительности послужившей исходным материалом для угля, а также условиями протекания процессов первой стадии углеобразования – гумификации или торфообразования с возникновением обширной группы сложных гумусовых кислот; и второй стадии углеобразования – углефикации или метаморфизма торфа и угля.**

Залежи угля теоретически могли образовываться со времени появления на Земле достаточных масс многоклеточных водорослей. Древнейшие многоклеточные водоросли обнаружены в отложениях рифея возрастом более 1 миллиарда лет. **Однако малые размеры рифейских водорослей, очевидно, не могли формировать сапропель – водорослевый торф. В формировании сапропеля, наряду с отмершими водорослями, участвует микроскопический планктон (в том числе одноклеточный) как растительный, так и животный, но отмерший планктон в чистом виде дает начало образованию нефти – возникновение угля в этом случае исключено.**

**Вероятнее всего образование древнейшего угля имело место в вендском периоде, то есть позже одного миллиарда лет назад.** Однако древнейший в мире неизменный уголь найден на Тянь-Шане в Нарынской долине. Его возраст около 480 миллионов лет назад (ранний ордовик). Есть также сообщения о кембрийском угле, обнаруженном в Китае. При этом углистые породы – углисто-кремнистые и углисто-глинистые сланцы, графиты и тому подобное, обнаруживаются в отложениях всех эратем протерозоя во многих частях мира.

**Угли, образованные из высших растений, называются гумолитами. Сапропелиты – это угли, образованные из водорослей и они, в отличие от гумолитов, не содержат слоистостей, однородны по составу и более прочные.**

**В ордовике, ввиду отсутствия наземной растительности, углеобразователями являлись водоросли. С силура в углеобразовании принимают участие первые наземные высшие растения.**

**С девонского периода, когда появились первые леса, началась эпоха формирования угольных залежей, имеющих в наше время промышленное значение.** Девонские леса произрастали в периодически затопляемых приливами прибрежных морских зонах, часто в дельтах рек при впадении их в крупные соленые или пресные водоемы. Важнейшими лесообразующими породами деревьев девона являлись различные лепидодендроновые высотой 5 - 7 метров.

Растительность каменноугольного периода дала наиболее богатые залежи каменного угля (не бурого) на планете – название периода говорит само за себя. Пышный расцвет каменноугольных лесов обеспечили размножавшиеся спорами тропические деревья – в первую очередь лепидодендроновые, каламиты, сигиллярии, а также древовидные папоротники и древовидные хвощи. Произрастание карбоновых лесов было приурочено к жарким и влажным областям у

морских и внутриконтинентальных водоемов. Корневые системы этих деревьев были погружены в воду и в отмерший растительный слой, заваленный валежником. **Основную фотосинтезирующую функцию деревьев карбонового периода выполняла зеленая кора, которая обильно опадала, составляя основной компонент торфа того времени.** Поэтому каменноугольные леса называют коропадными. Длинные многометровые листья лепидодендронов и сигиллярий свисали метелками с коротких ветвей на самой верхушке стволов и не представляли существенную часть опада болотного леса.

Похолодание в середине периода повлекло за собой распространение на севере и юге планеты голосеменных кордаитовых с формированием кордаитовой тайги. Кордаиты были хвойными деревьями высотой до 30 метров с толщиной ствола до 1,5 метров. В своей верхней части они ветвились раскидистой кроной крупных ветвей. Кора кордаитов, как и у всех древовидных карбона, выполняла функцию фотосинтеза и опадала в течение всей жизни дерева. Кордаиты имели четкие годовые кольца, что свидетельствует о сезонности климата.



Лепидодендроновый лес каменноугольного периода. Ludek Pesek

В пермском периоде формировались крупные каменноугольные бассейны, не на много уступавшие по запасам угля бассейнам карбона. Пермские леса составляли кордаитовые, изменившие свой видовой состав, и плауновидные, которые к концу периода почти исчезли (лепидодендроновые вымерли в середине перми). Кроме этих деревьев на юге пермских континентов в субтропической и теплоумеренной зоне получили широкое распространение листопадные глоссоптериевые леса.



Отпечатки листьев *Glossopteris browniana*. Пермский период

Позднепалеозойские деревья были значительно менее устойчивы к сильным ветрам и эрозионной деятельности воды, чем современные. Палеозойские ураганы могли с легкостью положить весь лес на большой площади, но видимо скорость роста древовидной растительности в те времена превышала современную, и вскоре из молодой поросли снова вырастала лесная чащоба. Паводки и селевые потоки также часто сносили деревья и погребали их под грунтом. **Прижизненное захоронение не разложившейся, то есть не окисленной древесины способствовало углеобразованию.**

**В первом периоде мезозоя – триасе угленакопление почти прекратилось.** Триасовые угольные месторождения весьма редки. Главной причиной значительного сокращения процессов углеобразования явился засушливый и жаркий климат, господствующий на значительной площади суперконтинента Пангея, не способствующий произрастанию лесов. Объединение суперконтинента, начавшееся во второй половине перми, завершилось в триасе, а распалась Пангея к началу юрского периода.

**В юрском периоде началась следующая эпоха углеобразования, завершившаяся во второй половине мелового периода.** В юре уголь накапливался за счет папоротников, хвощей, саговниковых и хвойных. Юрский лес уже имел типично мезозойский вид и сильно отличался от позднепалеозойских лесов: древовидные папоротники имели весьма ограниченное распространение; широкое распространение получили саговниковые – деревья с небольшими стволами и с длинными перистыми листьями на верхушке похожие и на пальмы и на папоротники. Весьма распространены были гинкговые.



Отпечатки в юрском угле. Центральный Казахстан. Фото Александр Бабкин

В меловом периоде основными углеобразователями являлись саговниковые, беннеттитовые (близкие родственники саговниковых), древовидные папоротники, хвойные. Сформированные в первой половине мела цветковые (покрытосеменные) быстро заняли господствующее положение во второй половине периода. Древовидные формы цветковых достигли невиданных ранее размеров – высота деревьев превышала 100м, а толщина стволов достигала 15м.

**На рубеже мела и палеогена, то есть на границе мезозойской и кайнозойской эр, углеобразование почти прекратилось, но вскоре накопление углей возобновилось, причем в начале и середине эоценовой эпохи палеогена 56 - 37 миллионов лет назад угленакопление достигло самой высокой интенсивности в истории Земли.** В целом палеоген и неоген выделяются как очередная эпоха углеобразования – на этот раз формировались бурые угли, то есть угли, не достигшие пока каменноугольной фазы метаморфизма.

Пышная флора палеогенового периода была весьма разнообразной, что было обусловлено в целом теплым и влажным климатом на всей планете до начала олигоценовой эпохи, когда начало расширяться оледенение Антарктиды. Папоротники, пальмы, кипарисы, мирты, лавры, секвойи, платаны покрывали большую часть Евразии и юг Северной Америки. Северную часть Евразии и Северной Америки покрывали листопадные буки, дубы, березы, клены, ольха, гинкго, хвойные. Важнейшими растениями углеобразователями являлись: болотный кипарис, ольха и нисса. Углеобразование в палеогене проходило почти исключительно в озерно-болотных условиях. Больше всего угля накапливалось в Северной Америке и в Сибири. Каменные угли палеогена известны на острове Хоккайдо и на востоке Китая.



Отпечатки листьев. Палеоген. Восточный Казахстан. Музей природы. Академия наук Казахстана

В неогене углеобразующие леса составляли различные хвойные на севере (ель, сосна, лиственница, пихта) и широколиственные на юге (платан, лавр, ольха и многие другие).

В настоящее время в четвертичном периоде продолжается накопление отмершей растительности за счет цветковых, различной болотной травы и мхов в болотах северной Евразии и севера Северной Америки, а также за счет мангровых зарослей тропических побережий и, в меньшей степени, водорослей некоторых озер (сапропели). Угли четвертичного возраста неизвестны – отмершая растительность современности находится в виде торфа. Можно предположить, что сейчас началась следующая эпоха углеобразования со своими особенностями.

Со времени появления наземной растительности существовали особо благоприятные эпохи для накопления отмершей растительности и ее последующей углефикации. Можно выделить **две наиболее важные эпохи углеобразования: каменноугольная – карбон-пермская (около 40% запасов углей планеты) и бурогоугольная – палеоген-неогеновая (около 50% запасов углей).**

Скорость современного накопления торфа составляет около 1 мм в год. Из 1-метрового слоя торфа может получиться 20 см каменного угля. Значит 2м угля может образоваться через 10 000 лет; 200м за 1млн лет; 500м за 2,5 млн лет.

Бесперывное существование в течении 1-2 млн лет высокопродуктивного лесного массива на площади равной крупнейшим угольным месторождениям представляется вполне вероятным. Можно предположить, что сплошной угольный пласт с рекордной мощностью 240м (в австралийском штате Виктория) является результатом накопления отмершей растительности на протяжении около 1,5 млн лет.

Наиболее благоприятным рельефом для образования угля являются болотистые и озерные впадины и приморские побережья у речных дельт, обеспечивающие регулярное затопление и захоронение опавшей растительности, что блокирует воздействие воздуха и бактерий живущих за

счет древесины. Леса, произраставшие в районах активной вулканической деятельности, также подвергались регулярному захоронению (причем в живом виде) вулканическими осадками, а в некоторых случаях погребенные под вулканическим пеплом деревья не подвергались никакому биологическому и химическому воздействию – древесина сохранялась длительное время в неизменном виде. Например, на Аляске извлекли с глубины 760м ствол сосны возрастом 40 000 лет с полностью сохранившейся древесиной. На некоторых участках побережья Северного Ледовитого океана в ледниковых отложениях возрастом 10 000 – 20 000 лет нередко находки совершенно не изменившихся стволов деревьев.

**Отмершая растительность в контакте со свободным кислородом при помощи бактерий и грибов разлагается на углекислый газ и воду: целлюлоза (основной компонент древесины) +  $O_2 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$ . Если древесный опад (кора, ветви и листья) и стволы падают в воду или до своего разложения перекрываются рыхлым грунтом, то действие свободного кислорода и работа аэробных бактерий (бактерии, функционирующие на воздухе) прекращаются. В таких случаях захороненный растительный материал начинает подвергаться разложению другого типа – гумификации протекающей в анаэробных (бескислородных) условиях с участием анаэробных бактерий и специфических грибов с образованием торфа. Однако при захоронении углей доступ воздуха не всегда полностью перекрывался вышележащим грунтом, и свободный кислород окислял некоторую часть захороненной растительности – такой процесс называется фюзенизацией тканей. При фюзенизации кроме того происходит обезвоживание с частичным обугливанием растительного материала. В этом случае получается волокнистый сажистый уголь – фюзинит.**

**В первую очередь разлагается как в аэробных, так и в анаэробных условиях основной материал древесины – целлюлоза ( $C_6 H_{10} O_5$ )n на углекислый газ, метан и гуминовые кислоты; во вторую очередь разлагается более устойчивый лигнин (усредненная формула  $C_9 H_{10} O_2$ ,  $C_{10} H_{12} O_3$ ,  $C_{11} H_{14} O_4$ ), выполняющий цементирующую роль в древесине, склеивая пучки целлюлозных волокон – это второе по важности и объему вещество древесины. Лигнин в силу своей устойчивости считается основным углеобразующим веществом. Содержание лигнина в хвойных растениях выше, чем у листопадных, а теплота сгорания лигнина в 1,5 раза выше, чем у целлюлозы. Поэтому угли, сформированные из торфа хвойных деревьев, имеют повышенный выход углерода, водорода и других летучих веществ и повышенную теплоту сгорания.**

В состав растительности также входят белки, которые содержат азот, серу и липиды – группу углеводов нерастворимых в воде. К липидам относятся жиры, воски, смолы, составляющие до 30% массы водной растительности и бактерий. Липиды являются вторыми по важности веществами при образовании водорослевых углей – сапропелитов.

Вероятно, что состав растительных компонентов и их соотношение за сотни миллионов лет менялся. Однако исследования установили, что различные части современных и древних растений в условиях углефикации претерпевают одинаковые изменения с незначительными отличиями.

**Формирование торфа** является длительной биохимической реакцией постепенного окисления отмершей растительности за счет кислорода самой древесины с выходом  $CO_2$  и перехода древесного углерода и водорода в метан  $CH_4$  и образования гумусовых кислот. Этот комплекс химических процессов получил название – **гумификация**. При гумификации молекулярная структура органических остатков значительно упрощается. Углеводы почти полностью, а белки частично разлагаются с выделением газов: оксида углерода  $CO$ , диоксида углерода  $CO_2$ , метана

CH<sub>4</sub>, сероводорода H<sub>2</sub>S, аммиака NH<sub>3</sub>. После стадии оторфенения органику составляют наиболее устойчивые углеводороды: алифатические цепочки (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, присущие сапропелям и ароматические соединения (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), характерные для гумусов (торф высших растений).

Деятельность бактерий по переработке торфа зависит от кислотности торфа. Чем кислотность выше, тем меньше в нем бактерий и лучше сохраняется структура растений. Разложение торфа зависит и от температуры – при 35-40 градусах Цельсия бактерии разлагают целлюлозу с наибольшей скоростью.

Со временем процесс гумификации замедляется. Слой торфа уплотняется, вода отжимается, уменьшается содержание гуминовых кислот. В общем гумификация сводится к уменьшению доли кислорода и увеличению доли углерода. Глубоко гумифицированный торф постепенно переходит в состояние бурого угля. Превращение торфа в бурый уголь считается первой стадией (фазой) углефикации – метаморфического процесса значительного изменения химического состава торфа с ограниченным участием микроорганизмов. Метаморфизм углей большей частью обусловлен длительным воздействием давления перекрывающих пород и повышенной температурой в толще угля от 70 градусов С до 350 град.

В торфе содержится 50 % углерода, в буром угле – 65-70 %, в каменном угле – 75-90 %, в антраците – 95% углерода. Процесс метаморфизма углей сопровождается главным образом увеличением содержания углерода и соответственно снижением содержания кислорода и водорода путем отщепления наиболее слабосвязанных H-, O- и S-содержащих групп в виде газов и паров.

**Бурые угли образуются при низких температурах и при разных давлениях, однако чем глубже залегают буроугольные толщи, тем быстрее протекает дальнейшая их углефикация.** Бурые угли бывают бурого, коричневого, редко черного цвета, матовые или слабо блестящие.



Бурый уголь

Биохимические процессы на буроугольной стадии затухают, при этом газы (в основном это метан и углекислый газ) продолжают выделяться, но в меньшем количестве по сравнению с выделением «болотных» газов на торфяной стадии. На начальном этапе своего формирования бурые угли имеют еще вполне различимые древесные фрагменты и пористую текстуру – такой уголь

называется лигнитом. В составе бурого угля уже нет или почти нет целлюлозы, но сохраняется часть лигнина, который и определяет древесную текстуру угля. На предкаменноугольной стадии бурый уголь становится плотным и блестящим, но сохраняет свой бурый цвет.

Процесс образования углей может заканчиваться на буроугольной стадии (известны бурые угли карбонового периода). Чтобы образовались каменные угли, необходимы более высокие температуры и давление.

**Каменный уголь** – плотная порода чёрного, иногда серо-чёрного цвета; содержит 75-90% углерода, 2,5-5,7% водорода, 1,5-15% кислорода. Каменные угли имеют более минерализованный состав органической массы в отличие от бурых, меньший выход летучих и обладают меньшей влагоемкостью. Теплота сгорания – 30,5-36,8 МДж/кг. Большая часть каменных углей относится к гумолитам; сапропелиты и гумитосапропелиты встречаются в виде линз и тонких прослоев.



Каменный уголь. Фото Александр Бабкин

Большинство залежей каменного угля сформировались в палеозое, преимущественно во второй половине каменноугольного периода и первой половине пермского периода, примерно в интервале 320 - 270 миллионов лет назад. Образование каменных углей характерно и для девона, юры и мела. В палеогеновых и неогеновых отложениях каменные угли имеют весьма ограниченное распространение.

Для образования каменных углей необходимо давление 1000-3000 атмосфер и высокая температура – 100-300 град.С. Такие условия обычно обеспечиваются с глубины 5 км. Залегают каменные угли, также как и бурые, в форме пластов и линз мощностью от сантиметров до сотен метров и на разных глубинах – от обнажений на поверхности (в результате тектонических подвижек) до нескольких километров.

**Метаморфизм каменных углей** заключается в увеличении относительного содержания углерода и уменьшении содержания кислорода и водорода, снижении выхода летучих веществ. Также изменяется теплота сгорания, появляется способность спекаться в кокс; меняются другие физические свойства. Изменение физических свойств каменных углей в процессе



метаморфизма проявляется по линейному закону в зависимости от уплотнения вещества, или параболическим законом, отражающим структурные изменения. По линейному закону изменяются блеск, отражательная способность витринита, другие свойства. Пористость, плотность, спекаемость, теплота сгорания изменяются по параболическому закону, либо по смешанному.

Каменные угли на средних стадиях метаморфизма могут при некоторых условиях приобретать спекающие свойства — способность органического вещества переходить при нагревании от 130 до 180 град.С в пластическое состояние и образовывать пористую монолитную массу — кокс. Кокс имеет весьма высокую теплоту сгорания — поэтому уголь специально спекают в промышленных количествах для нужд металлургии.

**На крайней стадии каменноугольного метаморфизма угли преобразуются в антрациты — наиболее высокометаморфизованные угли.** Антрациты имеют темно-серую окраску; обладают металлическим блеском с характерной кристаллической структурой на изломе и хрупкостью. Содержание углерода в антрацитах 91—97%, влажность менее 8%. Мацералы в антрацитах просматриваются с трудом.

Псевдокристаллическая структура антрацита обусловлена молекулярной плоскостной структурой так называемого ароматического углерода. Доля ароматического углерода в антрацитах достигает 90%. Весь процесс углефикации сопровождается удалением неароматического углерода путем выделения метана и других газов, и ароматизации оставшегося углерода путем дегидрирования насыщенных циклических соединений, то есть увеличения в размерах кольцевых молекул углеводов. В результате на антрацитовый стадии метаморфизма уголь приобретает почти кристаллическое строение.



Антрацит. Фото Александр Бабкин

При дальнейшем метаморфизме антрацит превращается в графит — темно-серое до черного вещество с отчетливой кристаллической структурой и тусклым металлическим блеском. Графит уже не является углем.

Неорганические горные породы состоят из минералов, а уголь из микроскопических компонентов — мацералов. **Мацералы** — это не кристаллы и они не имеют одинаковый химический состав; это частицы растительного и животного происхождения — микроскопические водоросли и их

фрагменты, пыльца, споры, кутикулы, смоленные тельца и прочее. Частицы, которые не могут быть опознаны из-за глубоких изменений, называют основной массой, которую при микроскопических исследованиях подразделяют на прозрачную и непрозрачную. Основные характеристики мацералов угля – это показатель отражения и структура. Различия свойств мацералов связаны с исходным материалом – растительными остатками и с условиями химического преобразования остатков на торфяной стадии.

**Все мацералы делятся на три группы – витринит, экзинит (липтинит) и инертинит.**

Мацералы группы витринита имеют серый цвет различных оттенков, изменяющиеся по мере увеличения стадии метаморфизма в сторону светлого тона. Рельеф выражен слабее, чем у других типов. Витриниты обычно наименее зольные, то есть имеют малое количество минеральных примесей. Группа витринита включает три мацерала – телинит, коллинит и витродетринит и входит в состав всех каменных углей и антрацитов.

Группа семивитринита занимает промежуточное положение между группой витринита и инертинита, но ближе к витриниту. Мацералы этой группы серого или беловато-серого цвета, не имеют рельефа. Группа включает два мацерала – семиколлинит и семителинит.

Для группы инертинита характерны высокая отражательная способность и выраженный микрорельеф. Цвет от белого до желтого. В группу входит шесть мацералов – семифюзинит, фюзинит, макринит, микринит, склеротинит, инертродетринит.

Группа липтинита (экзинита). Цвет темно-коричневый, черный, серый в зависимости от степени углефикации. Группа включает шесть мацералов: споринит, кутинит, резинит, суберинит, альгинит и липтодетринит.

**По преобладанию тех или иных мацералов каменные угли делят на литотипы, которые можно различить невооруженным глазом. Основные литотипы это:**

**Витрен** — блестящий, со стеклянным блеском и раковистым изломом; твердый, хрупкий, состоящий из бесструктурного или со следами клеточной структуры вещества.

**Кларен** — блестящий, состоящий из однородной массы с небольшим количеством включений различных растительных элементов: спор, кутикулы, смоляных телец, измененных остатков растительных тканей.

**Дюрен** — матовый, плотный, вязкий, серого цвета; состоит из основной бесструктурной массы и небольшого количества различных элементов. В зависимости от преобладания микрокомпонентов выделяют споровый, кутикуловый и другие дюрены.

**Фюзен** — матовый, волокнистый с шелковистым блеском, хрупкий, мягкий; пачкает пальцы; имеет клеточное строение. Если стенки клеток набухшие, отверстия малы или нет совсем, то такой ингредиент называют витренофюзен.



Кларен. Фото Александр Бабкин

Залежи угля часто представляют собой чередование пластов разных мацеральных типов. Разнотипное переслаивание связано с различными физическими и химическими условиями опада растительных фрагментов и их последующим переотложением до перекрытия грунтами.

В прибрежно-морских, в том числе лагунных и дельтовых обстановках осадконакопления, характерных для угленосных залежей, угольные пласты формировались на площадях в сотни квадратных километров. Внутриконтинентальная обстановка (озёрная, озёрно-болотная, речная) обусловила ограниченное по площади распространение залежей угля. Однако в кайнозойские внутриконтинентальные залежи углей не уступают по площади приморским.

В большинстве случаев уголь залегает пластами почти параллельно напластованиям вмещающих пород на обширных площадях. Первоначальное залегание пластов угленосных формаций нарушается – от слабоволнистого, до слоев, смятых в крутые складки. Кроме того нередки разрывные нарушения смещающие угленосные толщи.

Обычная мощность отдельных пластов – от нескольких сантиметров до нескольких метров. Рекордные мощности сплошных пластов достигают сотен метров.



Угольный пласт. Таджикистан. Фото Александр Бабкин

Большая часть включений в углях представляет собой минералы, образованные в процессе формирования угленосных формаций (кальцит, кварц, соединения железа, серы). Включения могут концентрироваться в трещинах или находиться в рассеянном виде по массе угля. Элементы, образовавшие эти минералы, содержались в самих растениях или были привнесены извне. Посторонние макровключения – валуны, галька, песок, заносились в торфяники еще во время их образования.

В зонах активного действия подземных вод вблизи дневной поверхности угли подвергаются окислению – в результате утрачиваются прочностные свойства, с превращением угля в сажистое вещество; изменяется и химический состав – возрастает относительное содержание кислорода, снижается количество углерода, увеличиваются влажность и зольность, значительно снижается теплота сгорания. Глубина окисления углей колеблется от 0 до 100 м.

На открытой поверхности уголь быстро выветривается под действием воздуха и осадков до полного разложения. Кроме того угли могут выгорать в результате окисления угля атмосферным воздухом.

### **Окаменение древесины**

**Окаменелое дерево** – это древесина, замещенная различными минералами кремнезёма (диоксид кремния –  $\text{SiO}_2$  с примесями) среди которых самыми распространенными являются **халцедон, кварц и опал**. Твёрдость окремненного дерева – 6 по шкале Мооса. Излом раковистый. Блеск стеклянный или восковой. Спайности нет. Сингония аморфная. При окаменении дерева текстура древесины нередко хорошо сохраняется – отчётливо видны годовичные кольца (если дерево имело их изначально), кора сохраняет почти полностью первоначальный рельеф. Например, окаменелый ствол, окрашенный в коричневый цвет лимонитом (один из минералов окиси железа), на первый взгляд может показаться свежеспелым деревом.

**Процесс окаменения (петрификации) упавших деревьев, происходит под землей, когда дерево оказывается погребенным под рыхлыми осадками. При отсутствии разлагающей и гумифицирующей жизнедеятельности бактерий и грибов, при изолированности погребенных стволов от массы отмершей растительности, а также из-за недостатка кислорода в подземных условиях, древесина может долго не портиться – известны извлеченные из грунта стволы с неизменной древесиной возрастом до 40 000 лет. Кроме того блокирование работы микроорганизмов обеспечивает фильтрация грунтовой воды насыщенной минералами.**

Первоначальный химический состав древесины при постепенной пропитке растворами кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) и кремниевых кислот ( $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  и другие) может полностью замещаться минералами окиси кремния с полным или частичным сохранением первоначальной текстуры древесного материала. Замещение древесины глинистыми и другими веществами происходит значительно реже и ведет к потере первоначальной текстуры и структуры.

Свойства окисей кремния достаточно легко растворяться и осаждаться в аморфной или тонкокристаллической форме позволяют этому соединению наиболее совершенно воспроизводить органические формы. Все остальные минералы осаждаются с образованием кристаллов, превышающих в большинстве случаев размеры мельчайших элементов древесного организма. Даже структура, то есть более тонкое строение древесины (вплоть до клеточного

уровня), также может замещаться кремнеземом с сохранением в какой-то мере первоначальной формы. Однако почти полное отсутствие окаменелых веток деревьев пока не находит объяснений.

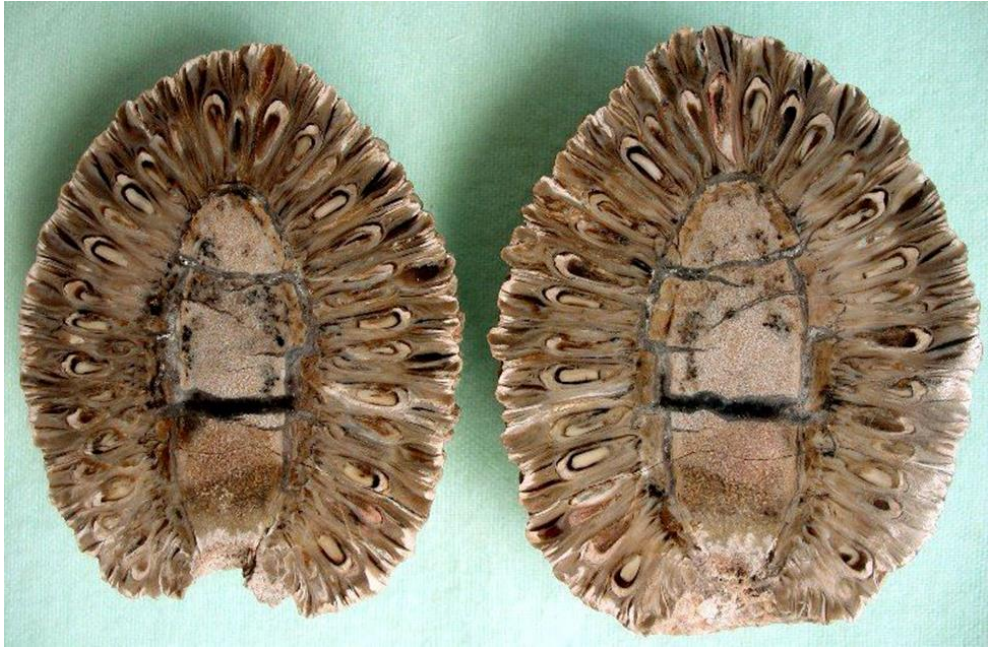
**Окаменению деревьев способствует быстрое перекрытие стволов рыхлыми осадками, которые препятствуют разлагающему действию свободного кислорода и обеспечивают движение подземных вод. Поэтому окаменелая древесина часто встречается в вулканических пепловых осадках или в речных отложениях.** Окремнению способствует также периодичное пересыхание подземного тока растворов, позволяющее кремнезему закрепляться в массе дерева. Поэтому окаменелые деревья чаще образуются в жарких районах переменной влажности.

Самые значительные залежи окаменелого дерева: США – в Аризоне, в Южной Дакоте, в Айове, в штате Вашингтон, в штате Миссисипи, в штате Колорадо; аргентинская Патагония, Египет (окаменелый лес у дороги Каир - Суэц, территория у Нового Каира, Маади, оазис Эль Фарафра), Россия (Средняя Сибирь, Камчатка, Приморье, Чукотка), Бельгия (около Хугардена), Бразилия (геопарк Палеоротта), Греция (окаменелый лес на острове Лесбос), Индия (Тируваккарай около Мадраса), Канада (остров Акселя Хайберга в Нунавуте на севере страны), пески Ливии, Новая Зеландия (залив Карью на Кэтлинском побережье), Украина (Донецкая область), Мадагаскар.

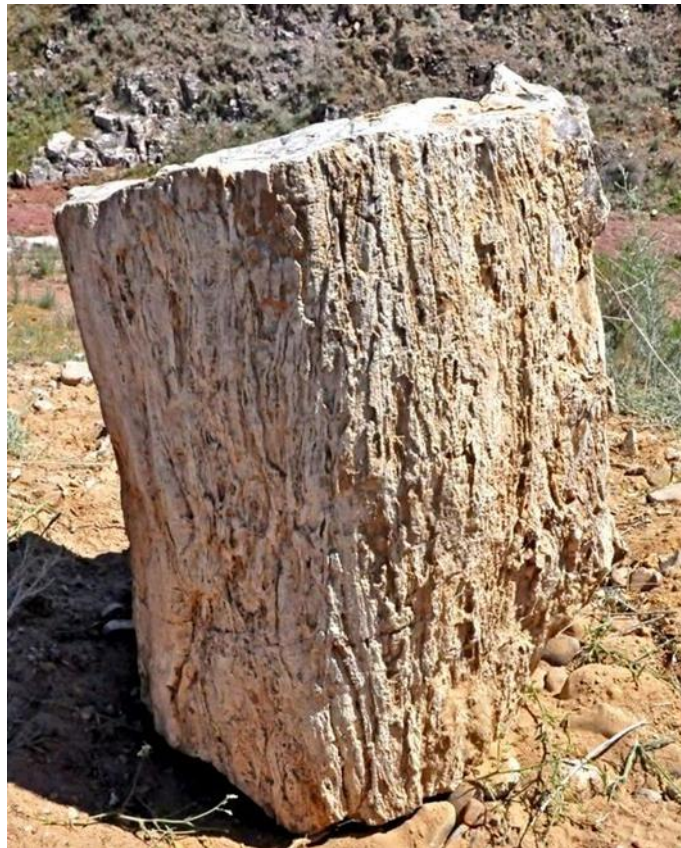


Петрифид форест. [Forest mtritter.org](http://Forest.mtritter.org)

Петрифид Форест (Окаменевший лес) в Аризоне. Обломки окаменелой древесины, замещённой тонкокристаллическим кварцем, залегают в триасовых конгломератах.



Окаменелый плод араукарии в разрезе. Юра. Аргентина



Фрагмент ствола секвойи. Меловой период. Юго-Восточный Казахстан. Фото Александр Бабкин

Замещение древесной органики неорганическими минералами в процессе окремнения идет без участия микроорганизмов – поэтому окаменение дерева процесс весьма медленный. Водный раствор кремнезема, текущий сквозь осадок, привносит минералы в клетки растения, и при распаде лигнина и целлюлозы (основные компоненты древесины, являющиеся углеводами) окись

кремния в своих разных модификациях замещает молекулы углеводов с сохранением формы, а точнее вида древесины. Пористость древесины не сохраняется – окаменелое дерево представляет собой сплошной камень. Поры дерева, первоначально заполненные жидкостью, также целиком замещаются кремниевыми минералами.

Кроме того при петрификации (окаменении дерева) идет окрашивание повторяющее первоначальную текстуру древесного материала. Окраску при петрификации обеспечивают следующие примеси: окиси железа дающие красный, коричневый и желтый цвета; марганец – розовый и оранжевый; окись марганца – чёрный и жёлтый; медь – зеленый и синий; кобальт – зелёный и синий; хром – зелёный и синий; углерод – черный.

Целлюлоза распадается в процессе окаменения с большей скоростью, чем лигнин, вследствие различий в химической устойчивости этих веществ. Решетчатая ткань целлюлозы сохраняется достаточное время до начала окремнения. После или в течение окремнения оставшаяся целлюлоза распадается, оставляя модифицированный, но сцепленный лигнин. Таким образом, **сначала замещается кремнеземом целлюлоза, а затем лигнин, причем замещаются эти углеводы кремнеземами из разного вида растворов и в разное время с образованием различных минералов** (опал, халцедон и другие). Мембраны ткани растений проницаемы для истинных кремнеземных растворов с весьма мелкими частицами и отдельными молекулами и атомами, но непроницаемы для частиц коллоидных растворов, то есть растворов с достаточно крупными частицами кремнезема. Такое распределение разных видов кремнезема по массе способствует сохранению исходной текстуры дерева. Вероятно, неравномерным окремнением объясняется и неравномерное окрашивание дерева, повторяющее древесную текстуру.

При выделении диоксида углерода в процессе разложения дерева, кремнезем сразу осаждается на поверхности органического материала. По мере того как органическая часть удаляется при растворении, она замещается кремнеземом. Процесс окремнения идет медленно. Первоначально образованный слой кремнезема аморфен и порист и представляет собой странное вещество – полукамень-полудревесину на которой можно оставить след ногтем. Кремнеземный раствор проникает через этот слой за счет диффузионных процессов. Такой процесс происходит большей частью при обычной температуре и концентрация кремнезема в растворе вряд ли превышает 0,02%. Тогда, согласно расчетам, скорость замещения древесины кремниевыми минералами (замещение, вероятно, проходит последовательно от коры до сердцевины ствола) будет составлять около 1 мм за 1500 лет.

При инфильтрации воды сквозь стволы деревьев в подземных условиях не весь кремний приносится с растворами извне. В растениях изначально всегда присутствует растительный кремний, который включается в процессы окремнения и, возможно, служит основным материалом при окаменении самых тонких структур древесины.

На конечной стадии образования окаменелого растения кремнезем может из аморфного состояния частично перейти в кристаллическую форму.