

УДК 553.676.2

© В.И. Ефимов

МЕТАМОРФИЗМ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТОВЫХ РУД И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ТОВАРНОГО АСБЕСТА

*ОАО "Средне-Уральская геологоразведочная экспедиция",
г. Асбест, 624260, ул. Сурикова, 81*

(Представлена чл.-корр. РАН К.К.Золоевым)

© V.I. Efimov

THE METAMORPHISM OF CHRYSOTILE-ASBESTOS ORES OF THE BAZHENOVO DEPOSIT AND ITS INFLU- ENCING TO COMMODITY ASBESTOS QUALITY

Автореферат

Исследования внутренней структуры хризотил-асбеста Баженовского месторождения показывает, что ломкий и продольноволокнистый разновидности имеют близкие содержания хризотила со спиральной решеткой, свидетельствующие о воздействии на волокно более поздних процессов метаморфизма. Товарный асбест, выработанный из руд с этими разновидностями хризотил-асбеста, характеризуется близкими минимальными для месторождения значениями содержания вредной фракции –0,14 мм, основного показателя его качества. Это позволяет осуществлять регулирование добычи асбестовых руд и использовать при подготовке шихты.

Введение

Современный период в промышленном освоении хризотил-асбестовых месторождений характеризуется продолжением активной антиасбестовой кампанией в мире, которая началась в середине восьмидесятых годов прошлого века. Одновременно с резким падением производства и потребления хризотил-асбеста, прекратились научные исследования вещества хризотил-асбеста и геологии его месторождений, произошли другие изменения: за последние десятилетия существенно понизилась глубина отработки Баженовского месторождения; в промышленное освоение вовлекаются новые горизонты залежей, руды которых не-

редко характеризуются пониженными технологическими свойствами. На качество товарного асбеста и его конкурентоспособность на рынке стали влиять его фракционный состав и особенно содержание фракции – 0,14 мм, геологические аспекты которой не совсем ясны и только начинается их изучение. Наиболее эффективным способом исследований в решении данной проблемы может стать сопоставление внутренней структуры разновидностей хризотил-асбеста, природных типов руд и качества выпускаемой товарной продукции.

1. Структура хризотил-асбеста

Представление о структуре хризотил-асбеста основано на исследованиях Т. Бейтса, И. Камера, Х. Ялодзински, Г. Кунце, Е. Уиттакера, М. Мейсера, К. Яады, Б.Я. Меренкова, Б.Б. Звягина, И.М. Лашнева, З.В. Лашневой, К.Г. Башты и др. Наиболее полно развитие представлений о структуре и свойствах хризотил-асбеста рассмотрены В.Д. Перлиным [9]. В кратком изложении они заключаются в следующем.

Как и всем серпентинам, хризотил-асбесту присуща кристаллическая структура слоевых силикатов, имеющая двухэтажное строение. Один этаж сложен кремне-кислородными тетраэдрами, другой – магний–гидрокислородным октаэдром, или, короче первый этаж называют кремне-кислородным или тетраэдрической сеткой, второй – бруситовым или октаэдрической сеткой. Несоответствие в размерах обоих сеток приводит к возникновению кривизны слоя, которая в структуре хризотил-асбеста проявлена в наличии спиральных завитков или концентрических цилиндров. В связи с тем, что размеры кремнекислородной сетки меньше размеров бруситовой, изгиб серпентинового слоя осуществляется таким образом, что бруситовая составляющая слоя оказывается снаружи.

Элементарные волокна хризотил-асбеста (фибриллы) по данным электронно-микроскопического изучения представляют собой протяженные трубки с отношением длины к диаметру более 100. Для них свойственны идеально равные внешние ограничения и наличие внутреннего канала. Наружный диаметр фибрилл изменяется от 10 до 65 нм, в среднем составляя 30-40 нм.

При электронно-микроскопических исследованиях волокна из различных типов асбестоносности Баженовского месторождения З.В. Бахтияровой и И.М. Лашневым получены следующие средние значения наружных диаметров: мелкая сетка - 28 нм, крупная сетка - 32 нм, сложные жилы - 29 нм, простые отороченные жилы – 34 нм [1, 2]. У В.Д. Перлина диаметр фибрилл укладывается в интервал от 34 нм до 41 нм. Диаметр мелких внутрифибриллярных пор составляет 4-5 нм, а крупных межфибриллярных – 8-10 нм [9].

Наблюдениями под электронным микроскопом в режиме микродифракции уверенно диагностируются три основные разновидности хризотила: клинохризотил, ортохризотил и парохризотил. Детальные микродифракционные исследования хризотил-асбеста Баженовского месторождения, выполненные З.В. Бахтияровой и И.М. Лашневым [2] показали, что трехчленная классификация хризотила не охватывает всех особенностей точечных электронограмм. З.В. Лашнева [8] предложила выделить четыре структурные группы, включающие монохризотил, п-слойные политипы, смешаннослойные и косослойные хризотилы. При этом в группу монохризотил объединены волокна, пакет слоев которых однородны и может быть представлен клино-, орто- или парохризотилом. В п-слойных хризотилах, выделенных З.В. Лашневой, впервые объединены частицы, картины микродифракций которых близки орто- или клинопироксену, но отличаются от них присутствием на четных слоевых линиях дополнительной серии регулярных рефлексов $h0l$.

Комбинационные хризотилы представляют собой сложные трубчатые частицы, в пакете слоев которых присутствуют две или три структурные разновидности хризотила: бихризотилы и трихризотилы.

К хризотилам со спиральной решеткой отнесены частицы, микродифракционные картины которых характеризуются расщеплением отражений $0k0$ и hko на дискретные серии с образованием дополнительных слоевых линий. Последние свидетельствуют об отклонении оси d слоев от направления удлинения трубки и приводят к преобразованию ее в винтовую линию, а решетка в целом деформируется в спиральную. Хризотилы со спиральной решеткой считает З.В. Лашнева, можно одновре-

менно относить к конкретным разновидностям монохризотил, п-слойным хризотилам или комбинационным образованиям.

В результате выполненного З.В. Лашневой количественного микродифракционного анализа проб волокна хризотил-асбеста, охватывающего практически все многообразие его развития на Баженовском месторождении, были определены: содержания клино- орто- парохризотила (основные характеристики), содержание монохризотила, п-слойных политипов, комбинационных хризотил (дополнительные характеристики) и оценены содержания хризотил со спиральной решеткой (табл. 1). Для наших исследований принципиально важными являются данные по содержанию хризотил со спиральной решеткой, которые оказались близкими на уровне 30 % в ломком и продольно-волокнистом хризотил-асбесте, что говорит о близких физико-химических условиях их образования, а также выводы о том, что высокие содержания хризотил со спиральной решеткой свидетельствуют о воздействии на волокно более поздних процессов метаморфизма.

Электронно-микроскопические исследования, выполненные К.Г. Баштой и др. [3] подтверждают структурное разнообразие фибрилл на Баженовском месторождении, однако их выводы о количественном распределении структурных разновидностей отличаются от проводимых З.В. Лашневой. По мнению К.Г. Башты, хризотил-асбест Баженовского месторождения является существенно клинохризотилковым, доля его составляет 76-86 % исследованных фибрилл; четкая связь парохризотила установлена с проявлениями продольного асбеста; по рентгеновским данным хризотил-асбест из разных залежей и зон асбестоносности практически не различается.

В работе [5] подчеркивалось, что как геологическое понятие, содержание фракции $-0,14$ мм в волокне хризотил-асбеста, только начинает формироваться. Началом исследований в решении вопроса, на наш взгляд, является рассмотрение минерально-петрографических аспектов содержания фракции $-0,14$ мм, начиная от ее высоких значений к низким. В результате на Баженовском месторождении в этом направлении выстраивается ряд асбестовых руд, соответствующих по составу лизардитовым, хризотил-лизардитовым, антигорит-лизардит-хризотило-

вым, антигорит-хризотилковым и хризотил-антигоритовым серпентинитам. По мере увеличения антигорита в асбестовых рудах волокно хризотил-асбеста приобретает более жесткую структуру и, дойдя до определенных значений, становится ломким, а содержание фракции –0,14 мм в таких рудах – минимальным.

По микрофракционным анализам З.В. Лашневой продольноволокнистый хризотил-асбест весьма близок к ломкому волокну. Он содержит наибольшее количество хризотил-асбеста со спиральной решеткой (табл. 1). По нашим исследованиям [6] существенная часть продольноволокнистого хризотил-асбеста месторождения также попадает в ломкие-полулукные разновидности. В отличие от поперечноволокнутого ломкого хризотил-асбеста, залегающего среди хризотил-лизардит-антигоритовых серпентинитов, руды с продольноволокнистым хризотил-асбестом слагают серпентиниты существенно α и β - лизардитового состава [10]. В результате получается, что идентичный или близкий по своим физико-механическим свойствам и внутренней кристаллической структуре ломкий хризотил-асбест вмещается различными по степени метаморфизма серпентинитами: продольноволокнистый асбест - лизардитовыми серпентинитами; поперечноволокнустый асбест – хризотил-лизардит-антигоритовыми серпентинитами. Исследования 30 штучных проб, отобранных из технологической пробы залежи Пожарной [11], наиболее крупной по запасам продольноволокнистого асбеста, показали, что в четырех из них представлен антигорит в количестве 5-10 %, развитый по α и β – лизардитам, а также по баститу. В связи с этим напомним, что на основе изотопно-кислородного термометра, разработанного Веннер и Тейлор [13] установлено, что серпентиновые минералы лизардит-хризотил-асбестовой группы образуются при температуре 85-115° С. Температуры образования антигорита находятся в пределах 250-460° С. По данным [12] образования хризотил-лизардитовых апотеридитовых серпентинитов Баженовского месторождения происходило при температуре 165° С.

Количественные соотношения между структурно-морфо-логическими разновидностями хризотила (З.В. Лашнева, 1985)

Тип асбестонности	Кол-во электроннограмм	Содержание разновидностей хризотила в %						Хризотилы со спиральной решеткой
		Основные			Дополнительные			
		Клинохризотил	Ортохризотил	Парахризотил	Монохризотил	Комбинационный	п-слоный хризотил	
А. Нормальный хризотил-асбест								
Мелкопрожил	178	53,2	38,5	8,3	25,7	37,4	36,9	4,9
Мелкая сетка	202	49,4	40,7	9,9	30,4	34,8	34,8	6,4
Крупная сетка	237	62,3	32,5	5,2	40,8	30,2	29,0	7,6
Сл.отор.жилы	468	72,6	27,1	0,3	42,8	14,0	43,2	6,2
Пр.отор.жилы	499	76,5	17,3	6,2	67,8	15,5	16,7	7,5
Б. Ломкий хризотил-асбест								
Мелкая сетка	240	59,3	28,0	12,7	41,1	24,7	34,2	28,2
Крупная сетка	320	73,6	20,8	5,6	50,2	24,2	25,6	17,3
Сл.отор.жилы	89	77,0	23,0	-	45,3	12,8	42,9	20,2
Пр.отор.жилы	443	79,5	18,1	2,4	63,8	15,3	20,9	26,7
В. Хризотил-асбест с пониженными технологическими свойствами								
Хризотил-асбест из п. от. ж. в метасом. дунитах	171	71,5	26,8	1,7	47,6	21,5	30,9	3,6
Хризотил-асбест из п. от. ж. в верлитах	241	50,1	43,2	6,7	33,1	28,3	38,6	9,7
Продольно-волокнустый хризотил-асбест, обогащен. немалитом	304	78,9	14,0	7,1	43,6	15,8	40,6	36,9
Хризотил-асбест из обособл.прожилков в офите	141	44,9	53,6	1,5	50,6	9,7	39,7	2,2

Полученные данные по условиям образования ломкого поперечноволокнутого и продольноволокнистого хризотил-асбеста указывают на их гетерогенность. Известно, что промышленные залежи ломкого поперечноволокнутого хризотил-асбеста сопровождаются развитием наложенной сравнительно высокотемпературной оливин-антигоритовой ассоциации [4]. Как предмет промышленного использования продольноволокнистый хризотил-асбест на ломкий асбест не использовался. Поэтому не исключены другие способы его образования на Баженовском месторождении, например, как это предполагается в монографии [10, стр. 89]. В то же время на месторождении выявлены наиболее общие и локальные закономерности в распределении типов и групп асбестовых руд, которые генетически связаны с формированием структуры рудного поля в дорудный этап в ходе протрузивного перемещения и меланжирования пластины гипербазитов [7]. Характер взаимодействия различных частей пластины гипербазитов при ее тектоническом перемещении отражает форма блоков перидотитов, их размеры и направление падения. Наиболее крупные блоки развиты в Главной асбестоносной полосе. Их длина по простиранию 1200-1300 м, в то время как в Западной полосе 600-100 м, а в Восточной – 150-50 м, т. е. иерархия блоков отражает тектонические нагрузки при перемещении гипербазитов и позволяет определить лежащий бок и другие элементы протрузии гипербазитов при их обдукции на микроконтиненты. Зонам разломов в современном разрезе гипербазитов соответствовали зоны тектонического меланжа в палеозое, которые по отношению к массиву гипербазитов были разделены нами на внешние (на эндоконтактах) и внутренние (внутри массива). По небольшим размерам перидотитовых блоков в Восточной асбестоносной полосе или по их отсутствию в строении залежей был сделан вывод, что эта часть массива гипербазитов являлась лежащим боком протрузии. По этому признаку Западной асбестоносной полосе соответствует ее висячий бок.

Тектоническое расслоение и будинаж гипербазитов сопровождалось формированием сложной трещинной тектоники. В интратрудный этап, когда район и гипербазиты находились в состоянии динамического растяжения, сопровождавшегося

приоткрыванием трещин, в последних отлагался хризотил-асбест. Поэтому сложившиеся типы асбестоносности наследуют систему трещиноватости. Отклонения от типичной зональности в смене асбестоносных зон залежей наблюдается довольно часто и отражает специфические черты тектонического расслоения гипербазитов в ордовике.

Интересна в этом отношении залежь Пожарная, приуроченная к Западной асбестоносной полосе. Здесь на протяжении сотен метров наблюдается закономерный переход от зоны отороченных жил в зону с косо - и продольноволокнистым асбестом. Наличие такой смены можно объяснить только проявлением тектонического меланжирования гипербазитов в дорудном этапе, но более высокого порядка, чем в зонах разломов. Если учесть, что основные промышленные запасы руд с косо – и продольноволокнистым асбестом сконцентрированы в залежах Западной асбестоносной полосы, а залежи Восточной сложены такими же рудами на 80 процентов, то с учетом ранее сказанного становится очевидным наличие генетической связи между природными типами руд (зонами асбестоносности) и иерархической соподчиненностью тектонических нарушений и трещинной тектоники. Приведенные данные показывают многообразие условий формирования руд с косо – и продольноволокнистым хризотил-асбестом. Рассматриваемые руды, локализованные в рудах меланжа, характеризуются наилучшим качеством (залежь Пожарная). Ниже качество руд в залежах, где продольноволокнистый хризотил-асбест приурочен к краевым частям внутренних и внешних зон меланжа. Многообразие структурно-тектонических условий формирования продольноволокнистого хризотил-асбеста обусловил и существенный разброс его физико-химических и механических свойств. Это необходимо учитывать при эксплуатации залежей с продольноволокнистым хризотил-асбестом, особенно тех, в которых не производилось изучение физико-химических и технологических свойств.

2. Сопоставление структуры хризотил-асбеста и качества товарной продукции

Наши знания о внутренней кристаллической структуре вещества сами по себе относительны, если они не находят адек-

ватного отражения в практике, в данном случае в эксплуатации уникального Баженовского месторождения. В нашей статье [6] отмечалось, что в настоящее время одним из основных показателей качества товарного хризотил-асбеста является содержание в нем фракции $-0,14$ мм, являющейся вредной примесью и определяемой на основе гидроклассификации. Сопоставление результатов микрофракционного анализа волокон хризотил-асбеста, содержащих хризотилы со спиральной решеткой на уровне 30 %, а это ломкий и продольноволокнистый хризотил-асбест, показывает близкие значения содержаний фракции $-0,14$ мм, которые существенно ниже, чем в рудах с нормальным хризотил-асбестом (табл. 2).

Таблица 2
Содержание фракции $-0,14$ мм в рудах с ломким и продольноволокнистым хризотил-асбестом
(по данным детальной разведки)

№№ п.п	Природные типы руд	Кол-во проб	Величина промыва, фракция $-0,14$ мм, %
1	Серпентиниты с продольноволокнистым асбестом	824	32,69
2	Перидотиты с отороченными жилами (ломкий асбест)	82	23,9
3	Серпентиниты с крупносетчатой асбестоносностью (ломкий асбест)	91	24,5
4	Серпентиниты с мелкосетчатой асбестоносностью (ломкий асбест)	101	27,3

Следует отметить, что по данным детальной разведки Баженовского месторождения содержание фракции $-0,14$ мм в рудах с ломким-полуломким хризотил-асбестом существенно повышается [5, табл. 3] и становится на уровне руд с продольноволокнистым хризотил-асбестом, среднее для промышленных типов руд 32,6 %.

Руды с ломким и продольноволокнистым хризотил-асбестом

на Баженовском месторождении относятся к рудам II технологической группы с пониженными технологическими свойствами, что объясняется просевом в подрешетчатый продукт (кл. $-0,5$ мм) большего количества волокна, чем в рудах с нормальным хризотил-асбестом. Из полученных выше материалов видно, что за счет более низкого содержания фракции $-0,14$ мм в рудах с ломким и продольноволокнистым хризотил-асбестом, возможна частичная или полная компенсация экономических показателей результатов обогащения. Следует учитывать, что руды на месторождении шихтуются перед обогащением на фабрике, и, как правило, один природный тип руд никогда не перерабатывается. Для получения товарного хризотил-асбеста заданного качества, в том числе и по содержанию фракции $-0,14$ мм, необходимо правильно составлять шихту асбестовых руд из различных природных типов, а для этого надо знать геометрию распределения их в карьерах месторождения, также иметь геолого-математическую модель. Математическая часть этой модели отражает фракционный состав волокна руд в каждом подсеченном геологическом блоке, который определяется классами: $+0,5$ мм, $+12,7$ мм, $+4,8$ мм, $+1,35$ мм и в геологических разрезах классами: $+1,0$ мм, $-0,14$ мм. Многообразие природных типов руд на Баженовском месторождении, а это руды с отороченными жилами, крупно- и мелкосетчатого руды, руды с ломким и продольноволокнистым хризотил-асбестом, делает проблему учета качественных показателей руд весьма сложной, но необходимой.

Заключение

Синтез результатов исследований показывает следующее.

1. Образование залежей и проявлений ломкого поперечноволокнистого хризотил-асбеста и ломкого продольноволокнистого хризотил-асбеста с промышленными содержаниями волокна происходило в несколько различных физико-химических и геотермических условиях, о чем свидетельствует различный минеральный состав вмещающих их серпентинитов.

2. Минеральный состав руд рассматриваемых разновидностей хризотил-асбеста не влияет на содержание фракции $-0,14$

мм в товаре, т. к. сущность ее связана с жесткостью (ломкостью) его волокна. Состав серпентинитов (β – лизардит, хризотил, антигорит) является индикатором геотермической обстановки образования хризотил-асбеста и его метаморфизма. Метаморфизм волокна выражается в развитыми во внутренней структуре ломкого и продольноволокнистого хризотил-асбестов около 30 % хризотилов и спиральной решеткой, а во вмещающей породе – антигоритизации. Существенно лизардитовый состав серпентинитов, вмещающих продольноволокнистый хризотил-асбест, являющийся по данным З.В. Лашневой, ломкой разновидностью, требует дальнейшего изучения и объяснения его природы.

3. Многообразие структурно-тектонических условий формирования продольноволокнистого хризотил-асбеста на Баженовском месторождении обусловил существенный разброс его физико-химических и механических свойств и возможность гетерогенности при приобретении свойств ломкой разновидности.

Литература

1. **Бахтиярова З.В.** Хризотил-асбест Баженовского месторождения. // В кн.: Магматизм, метаморфизм и оруденение в геологической истории Урала. Тез. докл. III Уральского петрограф. Совещания. Т. 2. Свердловск, 1974, с. 39-41.
2. **Бахтиярова З.В., Лашнев И.М.** Классификация структур разновидностей хризотила, устанавливаемых методом микрофракции электронов. // В кн.: геология и полезные ископаемые Урала. Тез. докл. III Уральской конференции молодых геологов и геофизиков. Свердловск, 1971, с. 135-136.
3. **Башта К.Г., Гурьев С.А., Корнеева Л.М.** Электронномикроскопические исследования хризотил-асбеста и офита. // В кн.: Добыча и обогащение асбестовых руд. Асбест, 1979, с. 3-61. (Тр. ВНИИПроектасбест вып. 21).
4. **Ефимов В.И.** Условия формирования и закономерности размещения ломкого хризотил-асбеста на Баженовском месторождении. // Автореферат диссерт. на соискание ученой степени к. г.-м. н., Свердловск, 1988.
5. **Ефимов В.И.** Минеральный состав природных типов руд Баженовского месторождения и качество товарного хризотил-асбеста по содержанию фракции $-0,14$ мм. // УГЖ, 2002, № 6 (30), с. 131-138.
6. **Ефимов В.И.** Исследование зон минерализации ломкого хризотил-асбеста Баженовского месторождения. // УГЖ, 2003, в печати.
7. **Ефимов В.И., Барабанов В.П.** Условия формирования структуры Баженовского месторождения хризотил-асбеста и закономерности в размещении природных и промышленных типов руд. СПб. Записки С.-П. гос. горного института им. Г.В. Плеханова, т. 143, 1997, с. 63-69.

8. **Лашнева З.В.** Геологические и структурно-морфологические критерии качества хризотил-асбеста Баженовского месторождения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. г.-м. н., Свердловск, 1985, с. 24.

9. **Перлин В.Д.** Структура, свойства и применение хризотил-асбеста в асбестоцементной промышленности. Итого науки и техники, сер. Неметалл. полезные ископаемые, 1973, т. 2, с. 74-127.

10. **Под ред. Золоева К.К., Попова Б.А.** Баженовское месторождение хризотил-асбеста. М.: Недра, 1985, 270 с.

11. **Тримайлова Г.А., Зырянов В.А., Крайнева Э.П.** Исследование технологических свойств асбестовых руд с продольным волокном в полупромышленных условиях и оценка свойств волокна в изделиях. // Отчет института ВНИИПроектасбест по научно-исследовательской работе. 1978, 80 с.

12. **Халепп Л.В., Бурд Г.И.** Температуры образования серпентиновых минералов. // Изв. АН СССР, 1984, № 8, с. 125-128.

13. **Wenner D.B., Tayber H.P.** Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based O^{18}/O^{16} fractionation between coexisting serpentine and magnetite. // Contreb. Mineral and Petrol., 1971, v. 32, № 3, p. 165-185.