

УДК 553.67.62

© В.И.Ефимов

## **РОДИНГИТЫ БАЖЕНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТА**

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

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

© V.I. Efimov

## **RODINGITES OF BAZHENOVO DEPOSITE OF CHRYSOTILE-ASBESTOS**

Автореферат

Родингиты Баженовского месторождения хризотил-асбеста, образовавшиеся по жильному асбестовскому комплексу основных пород и в приконтактных зонах даек диоритов каменского комплекса, несут большую генетическую информацию. Основная родингитизация жильных пород связана с аллометаморфической серпентинизацией и сопровождающим ее рудогенезом. В зонах минерализации ломкого хризотил-асбеста, насыщенных жилами родингитов, контакты которых были тектонически осложнены, широко развита пострудная антигоритовая серпентинизация. Определена негативная роль родингитов на промышленную асбестизацию пород, которая выражается в снижении ее в 1,5 раза на участках их концентрации (Северный участок).

**Ключевые слова:** родингиты, Баженовское месторождение, хризотил-асбест.

### **Введение**

Родингиты объединяют общее название метасоматических пород, образующихся при изменении базитов, которые расположены внутри альпинотипных серпентинитовых тел или в непосредственной близости от них [14]. Баженовский массив гипербазитов является типичным представителем альпинотипных ультрамафитов и вместе с контактирующим с запада массивом габбро и вмещающими их вулканогенными породами силура входит в состав офиолитовой ассоциации пород района [7]. Гипербазиты, продукты их серпентинизации и более глубокой гидротермальной проработки объединены в районе в баженовский комплекс, а относительно поздние габбро отнесены к ас-

бестовскому комплексу [2]. Положение жильной фации габбро в теле Баженовского массива гипербазитов и одноименного месторождения определяет характер развития родингитов, а неоднократные проявления процессов серпентинизации – полную родингитизацию жильного апогаббрового и частично диоритового комплексов пород. В результате в пределах Главного асбестоносного рудного поля месторождения оказались широко развитыми родингиты, родингитизированные оторочки диоритов. Первые из них являются важными структурными элементами месторождения [4], а развитие вторых – петрологическим критерием разделения жильных гранитоидов по возрасту.

Раньше среди других асбестоносных массивов гипербазитов габброидная и диоритовая природа родингитов была показана на примере Джетыгаринского, Кимбаевского, Луковского [11, 9] и Саянского [13] месторождений хризотил-асбеста.

В начале восьмидесятых годов прошлого века при выполнении исследований по сопоставлению данных разведки и эксплуатации Баженовского месторождения было обращено внимание на существенное понижение содержания хризотил-асбеста: в 2-3 раза в зоне отороченных жил, вплоть до непромышленного, в местах проявления жильного комплекса родингитов. На фоне общего понижения содержания резко ухудшается и сортовой состав волокна. Из сопоставления распространения жильного комплекса метасоматитов по отдельным эксплуатируемым десятиметровым слоям залежи Центральной, их первичной природы и содержания хризотил-асбеста во вмещающих их рудах, был сделан вывод, что дорудный габбровый жильный комплекс пород оказал негативное воздействие на последующее распределение хризотил-асбеста в местах своего проявления. Это заключение согласовывалось с более общим положением о сокращении благоприятных площадей и объемов альпинотипных гипербазитов дунит-гарцбургитовой формации под воздействием габбровой интрузии за счет образования дунит-клинопироксенитовых ассоциаций пород [1, 8]. Влияние этого жильного комплекса пород на последующее асбестообразование было ограничено небольшой мощностью тел и казалось незначительным. Полученные материалы, однако, инициировали более глубокое изучение пространственного положения родин-

гитов, их химического и минерального состава [3, 4, 6].

## 1. Особенности геологического строения месторождения

На Баженовском месторождении на размещение асбестоносности главное влияние оказывают вещественный состав гипербазитов и тектоническая структура рудного поля. В вещественном составе вмещающих гипербазитов сейчас выделяют две дорудные ассоциации гипербазитов: дунит-гарцбургитовая первичномагматическая и дунит-клинопироксенитовая метасоматическая [8]. Последняя не благоприятна для асбестообразования. Породы дунит-гарцбургитовой ассоциации, с которыми связана промышленная асбестоносность, представлена в основном энстатитовыми дунитами, дунит-гарцбургитами, гарцбургитами и реже дунитами. В целом гипербазиты дунит-гарцбургитовой ассоциации слагают центральную и почти всю южную часть массива.

Наибольшим развитием в пределах Главного рудного поля пользуются перидотиты (энстатитовые дуниты, дунит-гарцбургиты, гарцбургиты) с содержанием ортопироксена до 15 %. Перидотиты и образовавшиеся по ним серпентиниты слагают более 70 % общего объема пород месторождения. Они включают в себя целую гамму в разной степени серпентинизированных пород, в том числе подавляющую часть всевозможных серпентинитов. Серпентинизированные перидотиты распространены преимущественно в центральной и южной частях месторождения в виде блоков. Форма блоков округлая, чаще эллипсоидальная. Блоки перидотитов с окаймляющими их асбестоносными серпентинитами, ограниченными со всех сторон безрудными зонами разломов, представляют собой основные структурные единицы – асбестоносные залежи.

Серпентиниты слагают большую часть массива, располагаясь вокруг сохранившихся серпентинизированных блоков перидотитов разной мощности. В зонах разломов они образуют поля сплошной серпентинизации шириной до 0,5 км преимущественно лизардитового состава. Промышленно асбестоносные серпентиниты имеют обычно сложный минеральный состав: антигорит-хризотил-лизардитовый, антигорит-хризотил-лизардитовый,

95

часто встречаются перекристаллизованные антигоритовые и лизардит-антигоритовые серпентиниты, локализующиеся в не-

посредственной близости от разломов. Лизардитовые серпентиниты постепенно переходят в серпентиниты смешанного состава, которые непосредственно примыкают к блокам (ядрам) серпентинизированных гарцбургитов.

Серпентинизация гипербазитов происходила в два этапа. В первую стадию происходило развитие петельчатого серпентина  $\sim\alpha$  – лизардита. При аллометаморфической серпентинизации осуществлялась дополнительная лизардитизация, а также хризотиллизация и антигоритизация. Аллометаморфическая серпентинизация привела к образованию  $\beta$  – лизардита, она распространена значительно шире, чем ранняя серпентинизация. При антигоритизации образовался антигорит двух типов: антигорита I в блоках серпентинизированных перидотитов и антигорита II – в крайних проявлениях аллометаморфизма (Золоев, 1985), чаще всего в зонах разломов.

При определении возрастных взаимоотношений различных метасоматитов и жильных комплексов на Баженовском месторождении [4] было установлено, что процессы высокотемпературного метаморфизма широко были проявлены здесь только в пострудный этап. Они имели на месторождении всеобщий характер по зонам разломов и сопровождалась антигоритизацией, оталькованием, карбонатизацией гипербазитов и продуктов более раннего метаморфизма. Пострудный этап формирования был длительным и заключался в контактово-термальном воздействии на него всех фаз формирования адуйского гранитного комплекса. Все это подтверждает самостоятельность и обособленность антигоритизации во времени и многообразие форм ее проявления в зависимости от того, на какой субстрат она накладывается и в какой геолого-структурной обстановке проявлялась. В то же время не исключается возможность локального проявления антигоритизации в интравудный этап формирования месторождения в серпентинитах особенно на контактах с дайками диоритов каменского комплекса, как это было отмечено выше. Отметим, что с проявлением массовой антигоритизации связано образование ломкого хризотил-асбеста.

Сложившиеся за много лет исследований представления о

96 геотектонических условиях формирования Баженовского и других месторождений хризотил-асбеста отражают геосинклиальную концепцию геологического развития Урала. В соответствии

с ней формирование структуры рудного поля связывалось с проявлением прототектоники, разрывными нарушениями до-рудного этапа и одновременными с асбестообразованием. В пределах Главного рудного поля развито восемь крутопадающих зон разломов, каждая из которых прослеживается на расстоянии от 3,0 до 12,0 км. Гипербазиты рудного поля разделены ими на полосы меридионального простирания шириной от 50 до 300 м, реже 600 м. Диагональными и широтными разломами эти полосы расчленены на отдельные участки длиной до нескольких сотен метров, редко до 2,0 км, а горизонтальные и пологопадающие разломы, отстоящие друг от друга на расстояние до 900 м, разделяют их по вертикали. По периферии вдоль зон разломов эти участки асбестоносны, а в центральных частях включают блоки слабосерпентинизированных неасбестоносных перидотитов.

При геологическом доизучении масштаба 1:50000 (1974 г.) и 1:25000 (1989 г.) зоны сочленения Восточно-Уральского поднятия и одноименного прогиба, к которой приурочено Баженовское месторождение, было установлено широкое развитие структур будинажа и меланжа. Это дало толчок к рассмотрению вопроса образования блоков перидотитов в залежах и асбестоносных полосах как тектонических образований.

Разбуривание Баженовского месторождения до глубины 2,0 км по отдельным профилям с целью выяснения условий его залегания и определения перспектив асбестоносности показало, что сохранившиеся блоки перидотитов в центре залежей хризотил-асбеста не что иное как мегабудины, имеющие тектоническую природу. Была исследована последовательность образования трещин и их заполнителей на различных этапах формирования месторождения, а также изучены структурные и тектонические факторы контроля на дорудном этапе формирования месторождения. Выявлено, что их выполняют жильные тела родингитов апогаббровой природы. Масштабы распространения родингитов оказались сопоставимы, что будет показано ниже, с промышленной асбестоносностью месторождения. С учетом

97

этого был сделан вывод, что жильный габбровый комплекс пород внедрен в сильно тектонизированные гипербазиты (4).

## 2. Разновидности родингитов, распределение и

условия их залегания

Родингиты изучены в пределах Главного рудного поля; они расчленены по их первичной исходной природе и в зависимости от геолого-структурных условий залегания и мощности тел метасоматитов.

Габброидная природа метасоматитов устанавливается довольно четко по характеру перехода от слабоизмененных пироксенитов и микрогаббро к родингитам через пироксен-карбонатные и пироксен-гранатовые породы. Апогаббровые родингиты отличаются от родингитов, образовавшихся по диоритам, жильным характером выделения, небольшой мощностью жильных тел (табл. 1) и приуроченностью к различным структурно-петрологическим элементам неоднородности строения месторождения, в то время как последние развиты, преимущественно, в зонах разломов.

Таблица 1

Характеристика мощностей жил-комагматов габбро по керну скважин детальной разведки залежи Пожарной

Наименование пород	Число измерений	Видимая мощность		Истинная мощность	
		Среднее значение	Модальное значение	среднее значение	модальное значение
Пироксениты, Микрогаббро	31	0,79	0,11	0,5	0,08
Пироксен-карбонатные, пироксен-гранатовые породы	107	0,78	0,31	0,55	0,22
Гранатовые породы	82	0,80	0,23	0,56	0,16

Изучено распределение и условия залегания родингитов апогаббровой природы по залежам Пожарная, Щучья, Центральная, Южная и другим, в скважинах до глубины 500 - 700 м и 98

карьерах месторождения и установлено сравнительно широкое их развитие (рис.1). Масштабы распространения родингитов выявлены на основе замеров их мощностей по документации керна скважин и определения отношения суммарной мощности

родингитов к общей длине скважин. В результате стало известно, что в геологическом разрезе залежи Пожарной родингиты составляют в пересчете на объем от 0,63 до 6,2 %, а в среднем 2,72 %, т. е. масштабы трещиноватости в массиве гипербазитов при внедрении габбро оказались сопоставимы с трещиноватостью интравудного этапа, выраженного через весовые содержания хризотил-асбеста по залежам Пожарной (2,05 %), Центральной (2,84 %) и в целом по месторождению (2,38 %).

Распределение жильных родингитов по основным зонам асбестоносности, с которыми совмещаются и структурно-петрологические элементы неоднородностей строения месторождения, следующее:

- перидотиты и серпентинизированные перидотиты с отороченными жилами хризотил-асбеста – 21 %;
- серпентиниты с крупно - и мелкосетчатыми рудами хризотил-асбеста – 23 %;
- серпентиниты с косо - и продольноволокнистым хризотил-асбестом – 41 %;
- рассланцованные серпентиниты с просечками продольноволокнистого хризотил-асбеста (зоны разломов) – 15 %.

Следовательно, жильный комплекс пород комагматичный габбро был распределен в теле гипербазитов сравнительно равномерно, хотя и наблюдаются отдельные участки, обогащенные родингитами (рис.3). Эти участки фиксируют максимальные тектонические напряжения и сопровождающие их разрывы в гипербазитах, которые благодаря составу заполнителя позволяют восстановить в комплексе с другими элементами структуры характер палеотектонического режима в догаббровый период.

Тела родингитов апогаббровой природы залегают сериями и в виде единичных жил. Выделяются полого и крутозалегающие жилы, что указывает на развитие в период их формирования сложной системы трещиноватости в гипербазитах. Пологозалегающие жилы с углами падения 0-30° приурочены в современном разрезе к границе между блоками серпентинизированных

99

перидотитов и сетчатыми типами асбестоносности, а крутопадающие развиты ближе к зонам разломов. На залежи Пожарной, например, характерно следующее распределение тел родингитов по углам падения (125 замеров): 0-30° - 16 %; 31-60° - 55 %; 61-90° - 29 %. Кроме того, особенностью распределения тел ро-

дингитов является их наибольшая приуроченность к зонам удаленным от контакта с массивом габбро (рис.1, 2).

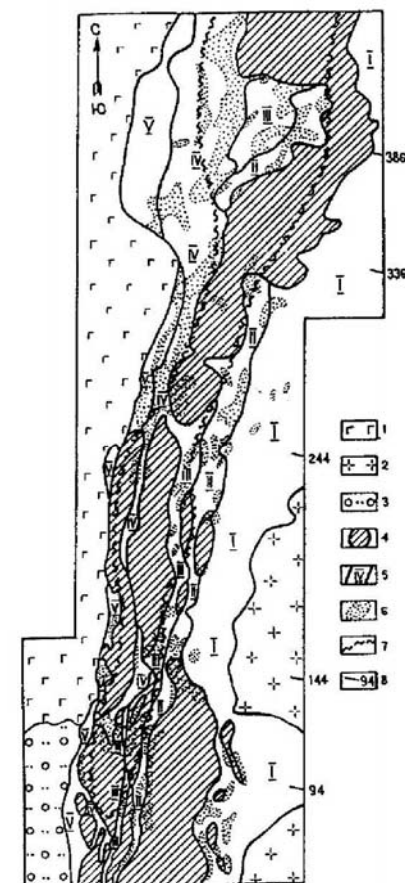


Рис. 1. Площадь преимущественного развития родингитов на Баженовском месторождении

1-габбро; 2-плагιοгpнниты рефтинского комплекса; 3-перидотиты антигоритизированные; 4-залежи асбеста; 6-зоны минерализации ломкого асбеста; 7-площадь преимущественного развития родингитов на Баженовском месторождении; 8-линии разрывов.

100

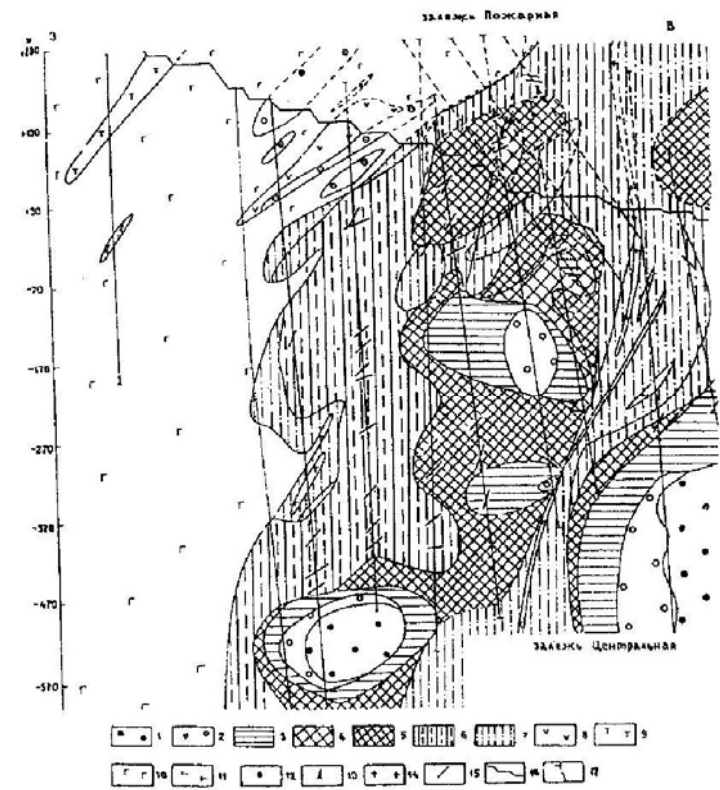
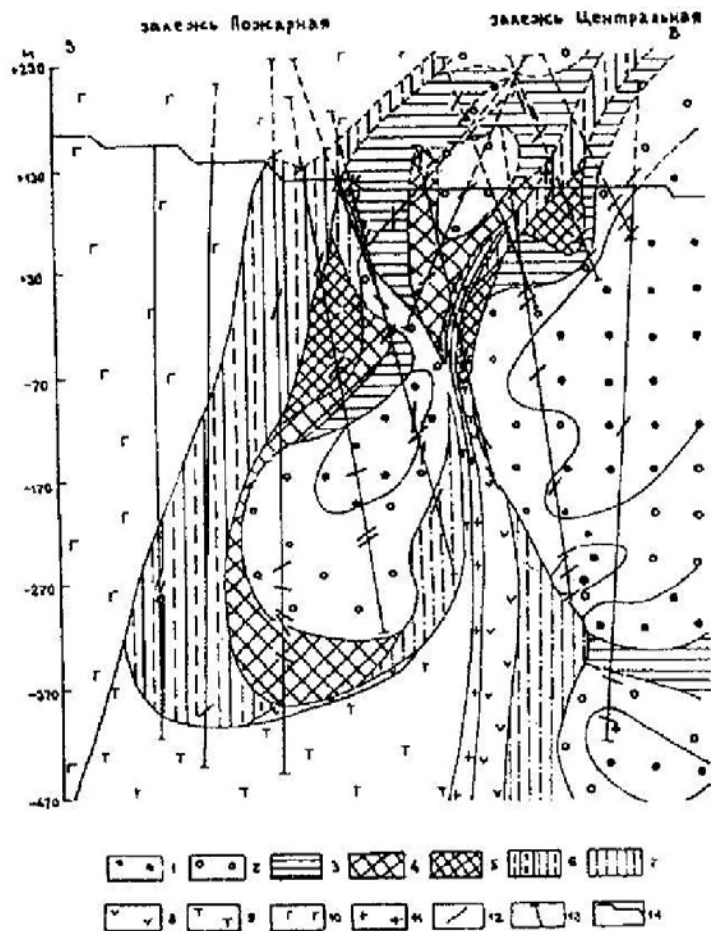


Рис. 2. Характер распределения тел родингитов на залежах Пожарная и Центральная в геологическом разрезе по линии 174

1-3-перидотиты: 1-безрудные, 2-с бедными отороченными жилами, 3-с отороченными жилами; 4-7-серпентиниты с асбестоносностью различных типов: 4-крупной сетки, 5-мелкой сетки, 6-косо-и продольноволокнистый асбест, 7-просечки асбеста; 8-серпентиниты неасбестоносные; 9-тальк-карбонатные, тальковые породы; 10-габбро; 11-диориты; 12-жилы родингитов; 13-скважины детальной разведки; 14-уступы современного карьера.

Рис. 3. Интрузивный характер контакта между массивами габбро и гипербазитов в геологическом разрезе по линии 204.

1-3-перидотиты: 1-безрудные, 2-с бедными отороченными жилами, 3-с отороченными жилами; 4-7 серпентиниты с асбестоносностью различных типов: 4-крупной сетки, 5-мелкой сетки, 6-косо-и продольноволокнистый асбест, 7-просечки асбеста; 8-серпентиниты неасбестоносные; 9-тальк-карбонатные и тальковые породы; 10-габбро; 11-родингиты; 12-пироксениты; 16-уступы современного карьера; 17-скважины детальной разведки.

При геологическом картировании северного борта карьера 1-2 была установлена приуроченность тел родингитов апогаббровой природы к плоскостям отслоения и трещинам отрыва. В первом случае родингиты мощностью до 1,5 м залегают полого среди неизменных перидотитов (рис.4), другие падают круто. Различные условия залегания родингитов на незначительных отрезках геологического разреза указывают на то, что в период внедрения жильных пород комагматов габбро уже существовали сформировавшиеся системы трещиноватости, которые определили пути проникновения жильной фации в тело гипербазитов и условия их локализации. При системном анализе трещиноватости Баженовского месторождения по методу К. К. Плюснина был сделан вывод, что жильные комагматы габбро (будущие родингиты) локализовались преимущественно в карадокской системе трещин ( $O^k_{2-3} - D^1_1$ ), находящейся в это время в состоянии растяжения [4].

Об интенсивной тектонической подготовке массива гипербазитов в догаббровый период, кроме отмеченных данных, свидетельствует резкое изменение углов падения контакта габбро с гипербазитами с крутого ( $70^\circ$ ) на глубине на пологое ( $0-30^\circ$ ) в приповерхностной части разреза. В результате образовался своеобразный “kozyрек” габбро, местами залегающий горизонтально, на продолжении которого в теле гипербазитов развиты пологозалегающие серии тел родингитов, т. е. оказываются увязанными габбро и его жильный комплекс совместно фиксирующие тектонически ослабленные зоны в период своего внедрения. Пологозалегающие серии тел родингитов, кроме того, трассируют сверху и снизу границы блоков серпентинизированных перидотитов с жилами хризотил-асбеста отороченного типа, в то время как крутопадающие тела родингитов контролируют их с боков. Таким образом, удалось выявить, что габбро инъецируют массив гипербазитов на различных гипсометрических уровнях апофизами в тектонически ослабленные зоны (рис.3). В теле же гипербазитов жильные родингиты апогаббровой природы, выполняя определенную систему трещиноватости, кроме того, подчеркивают эллипсоидальную форму блоков перидотитов, указывая тем самым на время ее образования.

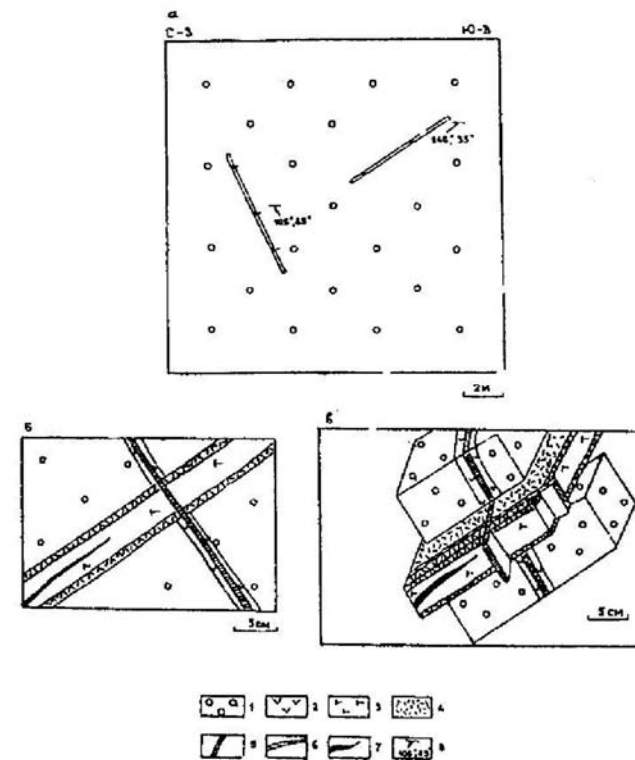


Рис. 4 Жилы родингитов в уступе 197-182 северо-восточного борта Южного карьера (а), деталь пересечения родингитов жилой хризотил-асбеста (б) и ее блок-диаграмма (в).

1-перидотиты, 2-серпентиниты, 3-родингиты, 4-перекристаллизованные (антигоритовые) серпентиниты, 5-поперечноволоконистый хризотил-асбеста, 6-продольноволокнистый хризотил-асбест, 7-серпофит, 8-элементы залегания родингитов: азимут падения и угол.

Родингиты совместно с вмещающими их породами подвергались пликативным и разрывным деформациям в орогенный период развития региона. Смятие в складки родингитов происходило в серпентинитах (рис.5), а разрывные перемещения, которые незначительны, характерны для более жестких пород – перидотитов (рис.6). Деформации сопровождалась антигоритизацией гипербазитов на контакте с родингитами.

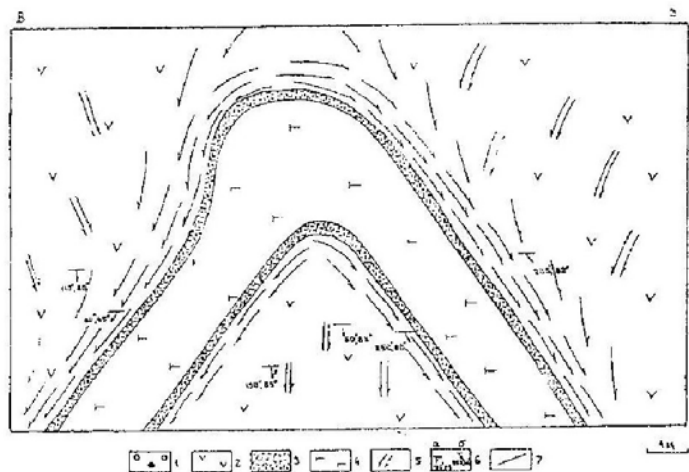


Рис. 5 Смятие в складку жилы родингитов, залегающей в зоне разлома. Уступ 197-182, южный борт Центрального карьера.

1-перидотиты, 2-серпентиниты, 3-перекристаллизованные (антигоритовые) серпентиниты, 4-родингиты, 5-направление расщепления, 6-элементы залегания: азимут падения и угол; 7-линия тектонического смещения.

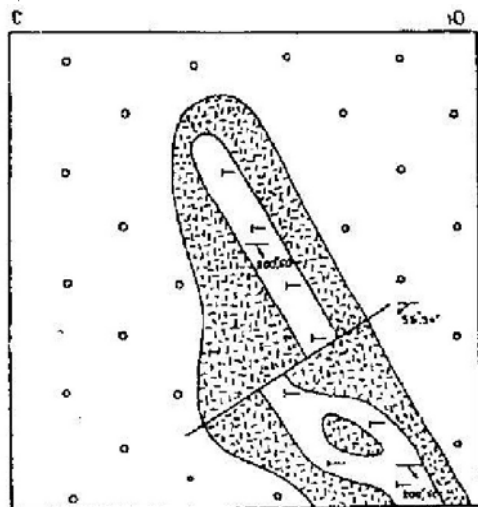


Рис. 6 Проявления пострудной тектоники в перидотитах и связанная с ней антигоритизация. Уступ 62-47, восточный борт Южного карьера. Условные обозначения на рис. 5.

### 3. Химический и минеральный состав родингитов

Химический состав родингитов изучался одновременно с определением количественного минерального состава. При отборе образцов на исследование апогаббровых родингитов мы исходили из предположения, что должна существовать определенная зональность по химическому и минеральному составу родингитов в зависимости от степени серпентинизации пород, в которых они залегают. Поэтому по условиям залегания все родингиты были разбиты на 4 класса, локализованные:

- в блоках серпентинизированных перидотитов;
- в асбестоносных серпентинитах;
- в серпентинитах зон разломов;
- в метасоматических оторочках диоритов.

Химический состав родингитов характеризует таблица 2.

Таблица 2

Химический состав родингитов в зависимости от условия залегания

Компоненты	Условия залегания родингитов			
	блоки асбестоносных перидотитов 22 анализа	асбестоносные серпентиниты 7 анализов	серпентиниты зона разлома 10 анализа	оторочки в диоритах 15 анализов
SiO <sub>2</sub>	38,06	40,20	41,31	45,25
TiO <sub>2</sub>	0,31	0,38	0,56	0,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,79	14,88	14,90	13,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,88	4,24	3,61	3,14
FeO	5,29	3,47	4,83	5,20
MnO	0,25	0,22	0,38	0,21
MgO	17,66	7,37	7,05	7,72
CaO	16,69	24,96	23,74	18,92
Na <sub>2</sub> O	0,13	0,26	0,28	1,23
CO <sub>2</sub>	1,23	0,81	1,06	0,94
п.п.п.	6,71	3,49	3,14	4,42

При рассмотрении химического состава родингитов видно, что их положение в пространстве определяет содержание кремнезема, глинозема, окиси и закиси железа, но, главным образом, магнелии и окиси кальция, будучи взаимосвязано с особенно-

стями состава вмещающего их субстрата. Для правильного понимания особенностей химического состава необходимо рассмотреть их минеральный состав (табл. 3).

Таблица 3

Минеральный состав родингитов (в %)

Первичная природа родингитов	Условия залегания родингитов	Минералы родингитов			
		гранат	клинопироксен	везувиан	хлорит
Габбровая	В блоках серпентинизированных перидотитов	<u>Ед.зн.-47</u> 9,9	<u>Ед.зн.-80</u> 40,2	<u>0-48</u> 11,2	<u>0-60</u> 33,2
Габбровая	В асбестоносных серпентинитах	<u>0-80</u> 43,8	<u>0-91</u> 32,5	<u>0-52</u> 8,0	<u>0-40</u> 8,1
Габбровая	В серпентинитах зон разломов	<u>0-93</u> 40,1	<u>0-98</u> 38,9	<u>0-60</u> 8,5	<u>0-15</u> 9,0
Диоритовая	Метасоматические оторочки в диоритах	<u>0-85</u> 18,5	<u>0-83</u> 33,1	—	<u>0-10</u> 2,6

Продолжение таблицы 3

Первичная природа родингитов	Условия залегания родингитов	Минералы родингитов				
		карбонат	цоицит	амфибол	эпидот	кол-во определенных
Габбровая	В блоках серпентинизированных перидотитов	<u>0-3</u> 0,3	—	<u>0-45</u> 4,75	—	20
Габбровая	В асбестоносных серпентинитах	<u>0-32</u> 2,3	<u>0-3</u> 0,3	<u>0-45</u> 4,0	<u>0-10</u> 0,6	17
Габбровая	В серпентинитах зон разломов	<u>0-20</u> 3,5	—	—	—	11
Диоритовая	Метасоматические оторочки в диоритах	<u>0-1</u> 0,3	<u>0-80</u> 38,6	—	<u>0-28</u> 5,4	7

Изменение минерального состава родингитов и количественного соотношения минералов в зависимости от условий залегания в Главном рудном поле позволяет сделать заключение о существовании зональности в изменении минерального состава родингитов от степени серпентинизации вмещающих их гипербазитов (табл. 4), которая выражается в следующем. В направлении от перидотитов к зоне разлома в родингитах резко возрастает содержание граната. В родингитах, залегающих в сер-

пентинитах залежей хризотил-асбеста и зон разломов, его содержание сравнивается с содержанием клинопироксена. Следовательно, минеральный состав родингитов может указывать на структурно-тектонические условия его локализации в рудном поле Баженовского месторождения.

Таблица 4

Минеральный состав родингитов апогаббровой природы в зависимости от структурно-тектонической позиции элементов неоднородностей

Вещественные и структурные элементы неоднородностей месторождения	Характерные минералы в порядке нарастания содержаний	Наименование родингита по составу
Серпентинизированные асбестоносные перидотиты, переходящие в блок неасбестоносных перидотитов	Амфибол-гранат-везувиан-хлорит-клинопироксен	Гранат-везувиан-хлорит-клинопироксеновая порода
Серпентиниты залежей хризотил-асбеста	Амфибол-цоизит-везувиан-хлорит-клинопироксен, гранат	Везувиан-хлорит-клинопироксен-гранатовая порода
Серпентиниты зоны разломов	Карбонат-хлорит-везувиан-гранат-клинопироксен	Везувиан-гранат-клинопироксеновая порода

#### 4. Петрографический критерий оценки возраста диоритов

Дайковый комплекс гранитоидов на Баженовском месторождении развит, главным образом, в зонах разломов. Состав даек изменяется от кварцевых порфиров до габбро-диоритов, но в пределах Главного рудного поля преимущественно развиты диориты. Они представлены неизменными диоритами, метасоматически проработанными в зонах контактов и породами полностью превращенными в родингиты. Совместное нахождение в зонах разломов пространственно разобщенных тел свежих неизменных диоритов и почти нацело превращенных в родингиты диоритов, что часто наблюдается в бортах карьеров месторождения (рис.7), свидетельствует о разновозрастности жильных образований. Следовательно, подтверждаются извест-



ные из других источников данные о проявлении в пределах месторождения жильных фаций гранитоидов, комагматичных рефтинскому, каменскому и адуйскому комплексам. Учитывая близость минерального состава и элементов-примесей в диоритах разных фаций, метасоматические изменения служат петрохимическим критерием оценки возраста диоритов каменского комплекса, как в пределах отдельной зоны разлома, так и месторождения в целом [3].

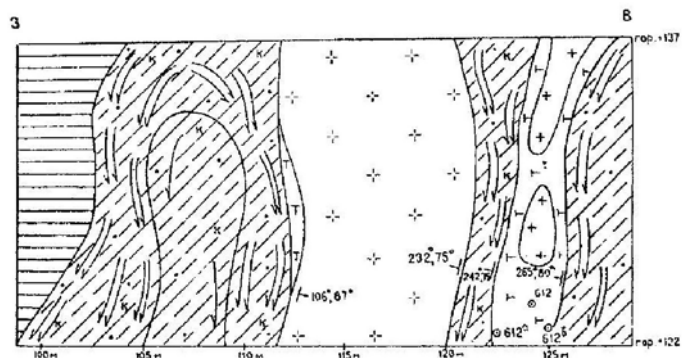


Рис. 7 Развитие неизмененных и метасоматически проработанных (родингитизированных) диоритов разного возраста в зоне разлома Южного участка. Условные обозначения на рис. 9

Родингиты, образовавшиеся по диоритам, диагностируются довольно точно, т. к. они образуют приконтактные метасоматические оторочки в жильном теле диорита и связаны с ним постепенными переходами. Мощность метасоматических оторочек колеблется от сантиметров до 2-3 метров, редко достигая 4-5 метров (рис. 8,9).

Тела диоритов залегают в зонах разломов и характеризуются как крутыми (60-70°), так и пологими (15-30°) углами падения, что и определяет положение в пространстве метасоматических оторочек.

Как правило, диориты с метасоматическими оторочками родингитов не сопровождаются в приконтактных зонах тальк-карбонатными породами, но бывают и исключения (рис. 10). В других местах вмещающие серпентиниты в зоне контакта с родингитами по диоритам оказываются перекристаллизованными

и сложенными антигоритовыми разностями. В этих случаях наблюдаем проявления интра- и пострудных процессов на месторождении: метасоматические родингитовые оторочки по диоритам образовались в интарудный этап, антигоритизация и оталькование – в пострудный этап, причем оталькование было проявлено на заключительном этапе гидротермального процесса [5]. Исходя из этих наблюдений, можно сделать вывод, что плоскости контактов диоритов каменского комплекса с вмещающими серпентинитами являлись путями, по которым поступали метаморфизирующие растворы в пострудный этап.

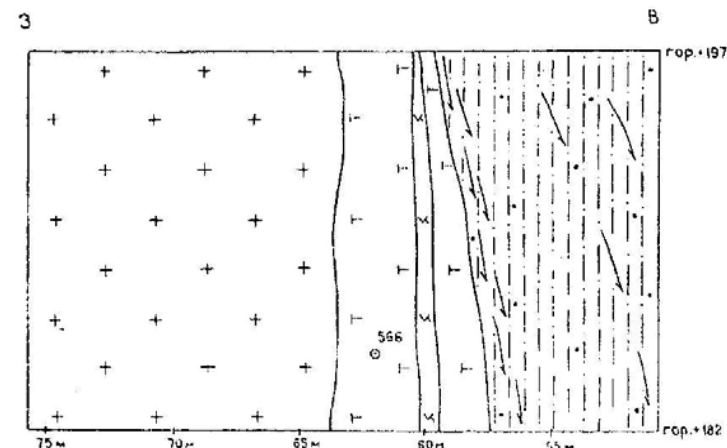


Рис. 8 Характер метасоматической оторочки в крутопадающих дайках диоритов. Условные обозначения на рис. 9

Химический и минеральный состав метасоматических оторочек диоритов изучены довольно полно. По сравнению с химическим составом (табл.2) родингитов апогаббровой природы описываемые родингиты содержат несколько больше кремнезема и меньше окиси кальция. По минеральному составу они характеризуются повышенным содержанием цоизита и эпидота (табл. 3).

Диориты Баженовского месторождения по содержанию основных окислов химических элементов отвечают номенклатуре диоритов и кварцевых диоритов. Попытки расчленить по возрасту на основании только химического состава, даже зная их

принадлежность к гранитовому комплексу, не дают результатов, несмотря на некоторый диапазон колебаний отдельных окислов. В то же время использование выявленного петрологического критерия, т. е. наличия родингитовой оторочки в диорите, дает возможность весьма точно отличить диориты каменского комплекса (нижний карбон) от диоритов адуйского комплекса (верхний карбон-нижняя пермь). Этот критерий имеет существенное значение при геометризации залежей ломкого хризотил-асбеста на Баженовском месторождении.

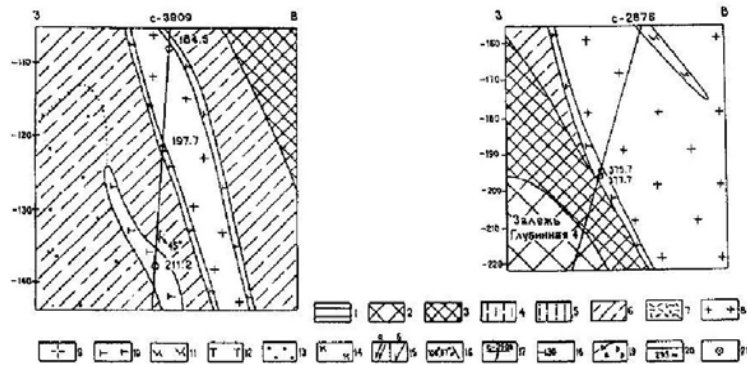


Рис. 9 Метасоматические оторочки в приконтактных частях даек диоритов каменского комплекса в скважинах детальной разведки

1-6-асбестоносные породы: 1-перидотиты с отороченными жилами, 2-серпентиниты с крупной сеткой, 3-серпентиниты с мелкой сеткой, 4-серпентиниты с мелкопрожилком, 5-серпентиниты с просечками поперечноволокнистого асбеста, 6-серпентиниты с просечками продольноволокнистого асбеста; 7-серпентиниты перекристаллизованные (антигоритовые); 8-диориты каменского (исетского) комплекса; 9-диориты адуйского комплекса; 10-родингиты; 11-серпентин-карбонатные породы; 12-талк-карбонатные породы; 13-зоны минерализации ломкого хризотил-асбеста; 14-проявление карбонизации; 15-а) тонкое рассланцевание, б) грубое рассланцевание; 16-элементы залегания пород (азимут и угол падения); 17-скважина детальной разведки; 18-отметки горизонтов относительно Балтийской системы высот; 19-осыпь, ее границы; 20-пикеты в основании уступа; 21-места отбора проб.

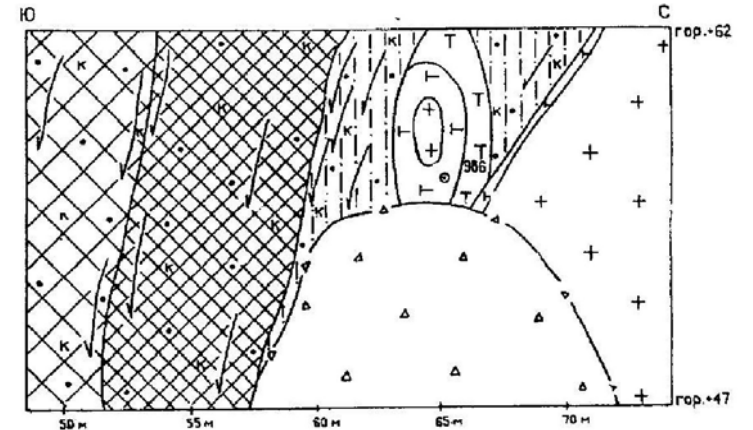


Рис. 10 Развитие тальк-карбонатных пород в приконтактной зоне с родингитами в уступе 62-47 западного борта Южного карьера. Условные обозначения на рис. 9.

## 5. Баланс вещества при образовании родингитов

Детально этот вопрос рассмотрен нами в работе [6], а здесь приведены только основные результаты исследований. Для выяснения баланса вещества при метасоматических процессах образования родингитов по жильному комплексу габброидов, залегающему среди серпентинизированных перидотитов и серпентинитов были выполнены пересчеты объемно-молекулярным методом [10]. Теоретический минеральный состав родингита был рассчитан для каждого минерала путем составления химических уравнений замещения исходного минерала и новообразованного. В результате установлено, что весь анортит исходной породы замещается гидрогроссуляром. При замещении происходит увеличение объема новообразованного минерала. Весь альбит (2,5%) замещается везувианом. В образовании везувиана участвует 0,2 % энстатита, содержащегося в начальной породе. Реакция образования везувиана идет без изменения объема.

Амфибол присутствует примерно в равных количествах в исходной и новообразованной породах. Химический состав амфиболов различен, в т. ч. по содержанию глинозема, по которо-

му было определено количество минералов, пошедших на образование роговой обманки в новой породе. В данном случае две трети амфибола участвовало в новообразовании роговой обманки и третья часть его – в образовании везувиана. На образование роговой обманки, кроме того, ушло 3,6 % объема энстатита. Весь хлорит (амезит), весь ферросилит и часть (7,2 %) энстатита идет на образование пеннина.

Таким образом, энстатит исходной породы в количестве 11 % объема был замещен везувианом, хлоритом, роговой обманкой, а остальная часть – диопсидом. Избытки окиси магния (7,2) и воды, в виде брусита, при метасоматическом процессе были вытеснены в раствор. Магнезиальные минералы энстатит и брусит в ходе метасоматоза полностью исчезают, в то же время происходит поступление из окружающей среды других окислов, таких как окись кальция, о чем свидетельствует химический состав родингитов (табл.2). Знание объемного содержания родингитов на месторождении, которое приводилось выше, в начале статьи, содержание ортопироксена (15 %) в гипербазитах, а также окиси кальция в пироксенах и родингитах, позволили рассчитать баланс окиси кальция и определить, что процессы серпентинизации гипербазитов и родингитизации жильных тел микрогаббро-пироксенитов протекали одновременно, и практически вся окись кальция из пироксенов шла на образование родингитов, т. е. между серпентинизацией и родингитизацией существовала парагенетическая связь. Практическая ценность этого вывода заключается в возможности использования родингитов, как критерия оценки существования вмещающих их серпентинитов, на которые были наложены пострудные процессы метаморфизма с образованием по ним тальковых и тальк-карбонатных пород, что имеет значение при выяснении условий локализации ломкого хризотил-асбеста.

#### 6. Обзор исследований по минералогии родингитов и метаморфизму Баженовского месторождения

В последние годы родингиты вообще и Баженовского месторождения в частности стали предметом детальных исследований для преподавателей и студентов геологических факульте-

тов Санкт-Петербургского и Московского государственных университетов, а также Уральской государственной горно-геологической академии [17, 18, 19], проводимых под эгидой Уральских летних минералогических школ в 1995-2000 гг. В результате детально изучен минеральный состав родингитов Баженовского месторождения [15]. Оригинальные данные по минералогии халкогенидов и цеолитов, развитых в родингитах, хорошо вписываются в структуру настоящей статьи, системно освещающей положение родингитов, условия их залегания, вопросы химизма и генезиса с позиций существующих неоднородностей строения месторождения. Напомним, что элементами неоднородности строения месторождения на уровне массива гипербазитов, выделенными при изучении уникального месторождения, являются блоки серпентинизированных перидотитов и перидотитов, асбестоносные серпентиниты, серпентиниты зон разломов, все вместе образующие в целом структуру мегабудинажа. В начальные этапы своего развития пограничные зоны будущих элементов неоднородностей, как тектонически ослабленные, наиболее интенсивно инъецировались и трассировались апогаббровым жильным комплексом (будущие родингиты) [3]. В окончательном виде структура мегабудинажа сформировалась в процессе обдукции Баженовской пластины гипербазитов на Адуйско-Мурзинский микроконтинент [21].

Характеризуя условия образования родингитов и вмещающих их серпентинитов, пород рамы – габбро асбестовского и плагиогранитов рефтинского комплексов, исследователи [17, 18] относят их к конечным метаморфитам пренит-пумпеллиитовой (ППФ) и цеолитовой фаций (ЦФ). Ранее другими исследователями [16] рассматриваемые метаморфиты были отнесены к зеленокаменному и зеленосланцевому типу метаморфизма. В гипербазитах Баженовского массива эта граница проводилась между образованиями петельчатого ( $\alpha$ ) и ленточного ( $\beta$ ) лизардитов.

Метаморфизм ППФ захватил не только магматические образования, но и стратифицированные толщи ордовика, силура и раннего среднего девона. В зависимости от исходного состава перечисленных пород развиты метаморфические новообразования (альбит, эпидот, пренит, пумпеллиит, серпентин, хлориты,

брусит, гидрогранат, везувиан). Апогипербазитовые метаморфиты представлены серпентинитами, апобазитовые – альбит-хлорит-клиноцоизит (эпидот)-актинолитовыми породами, а среди серпентинитов – родингитами. Кислые породы, преимущественно диориты среди серпентинитов, несут родингитовые оторочки, что показано нами выше.

Лизардитовые серпентиниты, которые развиты преимущественно в зонах разломов и вмещают родингиты апогаббровой природы, являются по первичной степени метаморфизма слабомагнитными породами. Но эти ранние серпентиниты зон разломов Баженовского месторождения инъецированы многочисленными дайками гранитоидов каменского и адуйского комплексов пород, что обусловило развитие наложенных процессов метаморфизма, которые в ходе рудогенеза сопровождались выделением магнетита в связи с образованием в серпентинитах хризотила и антигорита. Следовательно, с позиций современного геологического разреза зоны разломов являются образованиями весьма неоднородными и выделение ранних или «немагнитных» серпентинитов и вмещающих их ранних родингитов можно только в ретроспективном плане, что, однако, в работе [18] не подчеркивается.

Для иллюстрации минерального многообразия серпентинитов зон разломов приводим результаты наших исследований [20] распределения минеральных ассоциаций (табл. 5), из которых видно, что содержание хризотила и антигорита, при образовании которых происходило выделение магнетита, составляет от 10,7 до 24,9 %. Такой же уровень содержания хризотила и антигорита характерен и для серпентинитов, вмещающих просечки эластичного хризотил-асбеста (табл. 6).

При изучении распределения магнетита [5] в природных типах асбестовых руд месторождения были установлены его содержания и в рассланцованных серпентинитах зон разломов, вмещающих просечки эластичного и ломкого хризотил-асбеста. Содержание магнетита в этих серпентинитах составляет соответственно 3,0 и 2,7 %, при уровне его содержания в интервалах промышленных руд – 3,7 и 2,9 %, что надежно фиксировалось в скважинах детальной разведки при проведении магнитного каротажа.

115  
Таблица 5

Минеральный состав рассланцованных серпентинитов, вмещающих просечки ломкого асбеста в зонах разломов

Участки месторождения	Зоны разломов	Кол-во определений	Минеральный состав, %					
			α – лизардит	β – лизардит	хризотил	антигорит	карбонаты	тальк
Северный	II	2	-	98,6	-	-	1,6	-
	IV	35	8,0	79,0	2,3	8,8	1,0	0,7
	среднее		7,4	80,2	2,4	8,3	1,1	0,5
Центральный	II	8	-	83,7	14,4	2,2	0,6	-
	III	11	-	60,0	22,2	12,8	4,0	1,0
	IV	25	25,8	45,2	1,5	25,6	1,1	0,9
	среднее		15,2	57,1	9,8	15,1	1,8	0,8
Южный	I	6	19,6	37,6	0,6	37,6	4,8	-
	II	11	-	74,1	2,7	16,2	5,6	1,6
	III	53	-	74,6	2,7	20,0	3,0	-
	IV	7	-	86,2	1,6	8,2	4,1	
	среднее		1,5	72,4	2,6	19,9	3,4	0,4
Главное рудное поле	I	7	16,7	46,4	0,5	32,0	4,0	-
	II	21	-	80,0	7,2	8,7	3,2	0,8
	III	64	-	72,4	6,1	18,2	3,2	0,2
	IV	67	14,2	66,8	1,9	14,9	1,3	0,6

Таблица 6  
Минеральный состав рассланцованных серпентинитов, вмещающих просечки нормального асбеста в зонах разломов Баженовского месторождения

Участки месторождения	Зоны разломов	Кол-во определений	Минеральный состав, %					
			α – лизардит	β – лизардит	хризотил	антигорит	карбонаты	тальк
Главное рудное поле	I	16	7,6	62,4	14,1	2,8	1,6	-
	II	13	39,0	50,4	6,4	2,8	1,6	-
	III	17	18,7	70,8	10,6	7,4	1,2	1,2

Подчеркивая в настоящей статье и работе [4] существенную роль, какую выполняют родингиты в структуре месторождения, трудно согласиться с [15, стр. 17] в том, что тела родингитов являются «скелетом», т.е. основными структурообразующими элементами массива гипербазитов, пусть и на отдельном этапе

становления месторождения, равно как и однозначное утверждение о разновозрастности апогаббровых жильных образований, и тем более выделение в родингитах [15, табл. I, в] мощностью 1-2 м «ксенолитов» серпентинитов.

Изучение минеральных ассоциаций родингитов, серпентинитов, габбро, диоритов, цеолитов и других пород позволило исследователям [18, 19, 15] создать модель эволюции метаморфизма Баженовского месторождения, общий тренд которой направлен от пумпеллиит-актинолитовой фации ( $t \sim 390^{\circ}\text{C}$ ,  $P \sim 4$  кбар) к цеолитовой ( $t \sim 220-150^{\circ}\text{C}$ ,  $P \sim 2$  кбар). В соответствии с этим, как считают авторы работ, последовательно изменяются минеральные ассоциации и состав силикатов, оксидов, гидрооксидов и халькогенидов. В целом с такой схемой метаморфизма месторождения можно согласиться, за исключением того, что неясно, куда в этой схеме поставить пострудный метаморфизм, охвативший все месторождение в целом, который привел к образованию залежей и рудопроявлений ломкого хризотил-асбеста и превращению части их в тальк-карбонатные породы. Кстати сказать, такого масштабного пострудного метаморфизма не известно ни на одном месторождении хризотил-асбеста баженовского подтипа. Этот пострудный отрезок геологической истории Баженовского месторождения был нами детально изучен [5]. Установлена генетическая связь ломкого хризотил-асбеста с гранитоидами адуйского комплекса. Метаморфизм Баженовского месторождения в пострудный этап его развития и превращение эластичного хризотил-асбеста в ломкий происходили в интервале глубин 5,0-6,0 км от поверхности Земли при температурах  $350-600^{\circ}\text{C}$ , при понижении рН среды до 7,60 в зонах разломов и 8,25-8,37 в залежах, что указывает на кислый характер растворов (флюидов).

По развитию характерных минералов и парагенезисов в пострудном этапе развития выделено три стадии высокотемпературного метаморфизма, соответствующие последовательному образованию ломкого хризотил-асбеста, антигорита и вторичного оливина; талька и карбонатов; ашарита. Наложение тальк-карбонатного метасоматоза на ранее сформировавшийся ломкий хризотил-асбест подтверждено электронно-микроскопическим анализом псевдоморфоз талька по асбесту. Формирова-

ние ломкого хризотил-асбеста связано с проявлением на Баженовском месторождении главной фазы адуйского комплекса; дайковой, пегматитовой, гидротермальной фазам соответствует внедрение жильных гранитоидов, которые не несут родингитовых оторочек, и образование тальк-карбонатных пород; заключительному этапу гидротермальной фазы, по нашим данным, соответствует проявление ашаритовой минерализации, которую мы встречали при проведении детальной разведки, наложенной на все образованные породы до глубины 2,0 км. Возраст образования ломкого хризотил-асбеста датируется  $S_3$ , тальк-карбонатных пород и ашаритовой минерализации -  $P_1$ .

Возвращаясь к работам [18, 19, 15], следует отметить, что в публикациях нет ни одной привязки исследованных образцов к скважинам детальной или эксплуатационной разведки, горизонтам, уступам, залежам месторождения, которые можно было повторно отобразить или сопоставить с результатами наших исследований. Создается впечатление, что все исследования построены на коллекционном материале цеолитов. Надо отметить, что цеолиты на месторождении проявлены всего в нескольких точках и являются добычей только организованных «хитников», т.е. цеолиты развиты весьма узко, что соответствует весьма ограниченному масштабу проявления гидротермальной деятельности. По крайней мере, мы нигде в карьерах цеолитовую минерализацию не встречали совместно с ашаритовой, а площади развития последней в карьерах значительны. По нашим представлениям, цеолитовая минерализация на месторождении является результатом проявления отраженной активизации гидротермальных процессов в условиях платформенного развития района, начавшейся в поздней перми, т.е. в этом отношении наша позиция идентична М.С.Рапопорту [17].

## Заключение

Родингиты, образовавшиеся по жильному асбестовскому комплексу основных пород и в приконтактных зонах даек диоритов каменского комплекса, несут большую генетическую информацию, что совместно с другими геологическими данными позволило рассмотреть ретроспективу формирования габбро-

гипербазитов, структуры и этапы развития Баженовского месторождения с ордовика по триас-юрское время [4, 5]. Существующая зональность в минеральном составе родингитов зависит от степени серпентинизации вмещающих их гипербазитов. По полученному нами балансу вещества [6] процессы серпентинизации гипербазитов и родингитизации жильных пород тел микрогаббро-пироксенитов протекали близко одновременно, т. е. между ними существовала парагенетическая связь. Основная родингитизация жильных пород связана с аллометаморфизмом гипербазитов и сопровождающим его рудогенезом. В определенных структурных зонах месторождения, главным образом, в зонах минерализации ломкого хризотил-асбеста, насыщенных жилами родингитов, развита пострудная антигоритовая серпентинизация, влияние которой на минеральный состав родингитов еще предстоит выяснить.

Основные аспекты значения родингитов в формировании Баженовского месторождения следующие:

1. Выявлено довольно широкое развитие родингитов апогаббровой природы и родингитизация приконтактовых зон даек диоритов.

2. Наследуя жильный габбровый комплекс в массиве гипербазитов, родингиты подчеркивают структуру макро- и мегабудинажа месторождения и эллипсоидальную форму крупных залежей хризотил-асбеста.

3. Минеральный состав родингитов апогаббровой природы определяется элементами неоднородности строения месторождения, которое напрямую зависят от степени серпентинизации вмещающих их гипербазитов.

4. Определена негативная роль родингитов на промышленную асбестизацию пород, которая выражается в снижении ее примерно в 1,5 раза на участках их концентрации (Северный участок).

5. Петрологическим критерием оценки возрастных отношений диоритов различных гранитных комплексов на месторождении является родингитизация приконтактовых зон диоритов, что позволяет четко разделить каменный интравудный и адуйский пострудный комплексы.

6. В пострудный этап развития Баженовского месторождения контакты родингитов были тектонически осложнены и явились основными путями циркуляции гидротермальных растворов, антигоритизации гипербазитов и метаморфизма волокна хризотил-асбеста с превращением его в ломкое.

## Литература

1. Булыкин Л. Д. Основные черты геологии перидотитовой формации Урала. // В кн.: Магматические формации, метаморфизм, металлогения Урала. Свердловск, АН СССР, УНЦ, 1969, с. 18-29.
2. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000 // Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXVI. Свердловск, 1987, с. 161.
3. Ефимов В. И. Роль метасоматитов при определении этапности формирования Баженовского месторождения хризотил-асбеста. // Рудоносные метасоматические формации Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986, с. 23-24.
4. Ефимов В. И. Структурно-тектонические особенности формирования Баженовского месторождения хризотил-асбеста. // В кн.: Рудообразование в геологической истории Урала. Сборник научных трудов. М., 1987, с. 104-124.
5. Ефимов В. И. Условия формирования и закономерности размещения ломкого хризотил-асбеста на Баженовском месторождении. // Свердловск, 1988. Автореферат канд. диссертации на соиск. уч. ст., 16 с.
6. Ефимов В. И. О балансе вещества при образовании родингитов на Баженовском месторождении хризотил-асбеста. // Уральский геологический журнал, 2001, № 4, с. 101-108.
7. Золоев К. К. Месторождения хризотил-асбеста в гипербазитах складчатых областей. // М.: Недра, 1975, 192 с.
8. Золоев К. К., Чемякин В. И. и др. Баженовское месторождение хризотил-асбеста. // М.: Недра, 1985. 270 с.
9. Иванова В. П., Касатов Б. К. и др. Термический анализ минералов и горных пород. // Л.: Недра, 1974. 399 с.
10. Казицын Ю. В., Рудник В. Л. Руководство к расчету баланса вещества и внутренней энергии при формировании пород. // М.: Недра, 1968, 364 с.
11. Кузнецова В. Н. Жильные породы и продукты их метаморфизма. // В кн. Месторождения хризотил-асбеста СССР. М.: Недра, 1967, с. 448-454.
12. Москалева В. Н., Иванова В. П., Касатов Б. К. О родингитах из ультраосновных интрузий Казахстана и определении их минерального состава методом термографии. // Изв. АН СССР, сер. Геол., 1971, № 12, с. 75-85.
13. Сибилов А. К. Петрология и асбестоносность офиолитов. // Изд-во Наука, Сиб. отд. Новосибирск. 1980. 215 с.
14. Петрографический словарь. // М.: Недра. 1981, 445 с.
15. Антонов А.А. Минералогия родингитов Баженовского гипербазитового массива // СПб: Наука, 2003. с. 128.
16. Кейльман Г.А., Золоев К.К. Изучение метаморфических комплексов // М.: Недра, 1989. с. 207.

**17. Рапопорт М.С.** Геолого-петрографический очерк Баженовского месторождения // Минералогия родингитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста / Под ред. О.К.Иванова, Э.М.Спиридонова, В.Г.Кривовичева. Екатеринбург: Изд-во Уральский гос. горно-геол. академии, 1996. с. 13-24.

**18. Спиридонов Э.М., Барсукова Н.С., Антонов А.А.** Минеральные ассоциации метаморфитов Баженовского месторождения // Минералогия родингитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста / Под ред. О.К.Иванова, Э.М.Спиридонова, В.Г.Кривовичева. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. Академии, 1996. с. 25-44.

**19. Спиридонов Э.М., Барсукова Н.С.** Рудные минералы – халькогениды метаморфитов Баженовского месторождения // Минералогия родингитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста / Под ред. О.К.Иванова, Э.М.Спиридонова, В.Г.Кривовичева. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. академии, 1996. с. 62-81.

**20. Ефимов В.И.** Особенности петрографического состава пород, вмещающих зоны минерализации ломкого хризотил-асбеста Баженовского месторождения // УГЖ, 2003, № 5, с. 47-76.

**21. Ефимов В.И.** Геодинамические условия формирования месторождений хризотил-асбеста и изумрудов в Асбестовском рудном узле // Екатеринбург: УРО АН РФ, Литосфера (в печати).