

III. ПЕТРОЛОГИЯ

УДК 551.251

В. И. Сначёв

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ЗОНАЛЬНОСТЬ ПОРОД МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КОЧКАРСКОГО АНТИКЛИНОРИЯ (ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОЕ ПОДНЯТИЕ)

Аннотация. В работе на основе химического и микрорзондового анализа метаморфических минералов сланцевого комплекса Кочкарского антиклинория, а также данных математического расчета парагенетических ассоциаций по методу Д.С. Коржинского установлены физико-химические параметры метаморфизма пород; выделены ставролит-хлоритовая, ставролит-кордиеритовая и ставролит-жедритовая фации регионального метаморфизма; определены минералы, по появлению и исчезновению которых следует проводить границы между перечисленными фациями.

Ключевые слова: Кочкарский антиклинорий, метаморфизм, сланцы, парагенетический анализ, минерал.

Данная статья является продолжением результатов исследований, опубликованных в предыдущем номере Геологического сборника [Сначёв, 2013]. Необходимость возвращения к данному вопросу обусловлена незаслуженным забвением очень простого и информативного парагенетического анализа метаморфических пород по методу Д.С. Коржинского [1973], в совокупности с другими методами (петрографическим, микрорзондовым и т.д.) позволяющего заметно ближе подойти к правильному пониманию истории развития той или иной территории.

Кочкарский антиклинорий сложен в различной степени метаморфизованными осадочными и вулканогенно-осадочными образованиями преимущественно рифей-вендского возраста. С запада он отделяется от Сухтелинского синклинория субмеридиональным глубинным разломом, к которому приурочены небольшие массивы и тела ультрамафитов и гранитоидов. Стратиграфическая основа, принятая в данной работе, составлена с учетом данных, полученных в последние десятилетия нами и большим коллективом геологов Челябинской геологоразведочной экспедиции [Муркин и др., 1989ф; Моисеев и др., 2002ф; Сначёв и др., 2012].

В разрезе центральной части Кочкарского антиклинория выделяется семь толщ (снизу вверх): еремкинская гнейсосланцевая (RF₁₋₂), кучинская карбонатная (RF₂), благодатская обломочная (RF₂₋₃), светлинская сланцевая (RF₃), александровская вул-

каногенно-осадочная (V), кукушкинская (O₁₋₂), карбонатная (C_{1v-n}) (рис. 1). Подробно толщи описаны в работе [Сначёв, 2013] и здесь не приводятся.

Проблема формирования пород сланцевого комплекса Кочкарского антиклинория неоднократно рассматривалась в трудах ряда исследователей [Львов, 1965; Болтыров, 1973; Кейльман и др., 1973]. Однако, в связи с проведением здесь в последнее время буровых работ, появилась необходимость вернуться к этому вопросу вновь.

Кочкарский метаморфический комплекс сложен в разной степени метаморфизованными породами. Наибольшие преобразования испытали породы, обрамляющие массивы, которые в свою очередь фиксируют собой центральные части гранито-гнейсовых куполов. Именно здесь мы видим наиболее полный набор высокотемпературных минералов: гранат, ставролит, биотит, силлиманит, кордиерит, жедрит. С удалением от гранитоидных тел высокотемпературные минеральные парагенезисы уступают место средне- и низкотемпературным, закономерно меняется при этом и состав сосуществующих минералов. Выяснение этих закономерностей и явилось предметом наших исследований.

Вопрос о зональности пород сланцевого комплекса решался на основе парагенетического анализа по методу Д.С. Коржинского [1973]. С этой целью был проанализирован весь ряд минералов, наиболее широко развитых на рассматриваемой территории: роговая обманка, жедрит, биотит, силлиманит, кианит, кордиерит, гранат, ставролит, кварц, полево-

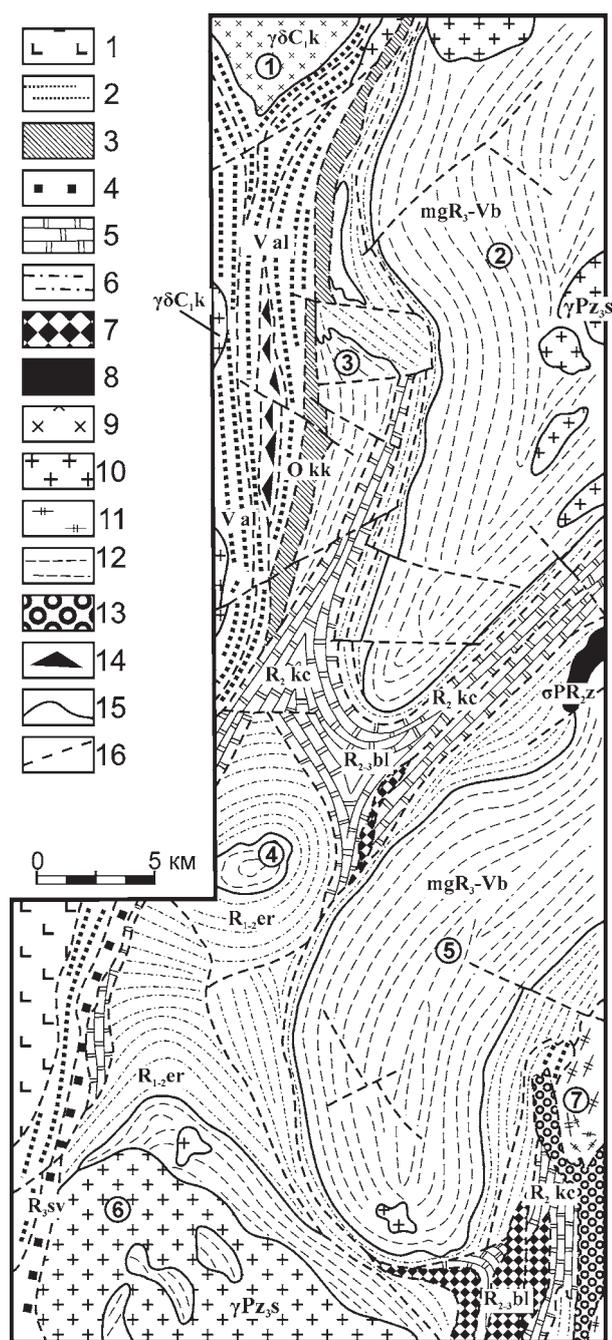


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кочкарской площади. Составлена В.П. Муркиным и др. [1989ф]

Условные обозначения: 1 — осадочно-вулканогенные образования Сухтелинского синклиория; 2 — венд, александровская толща; 3 — венд — ордовик, кукушкинская толща; 4 — верхний рифей, светлинская толща; 5 — средний рифей, кучинская толща; 6 — протерозой, еремкинская толща; 7 — образования благодатской толщи (катаклазированные силикатно-карбонатные породы); 8 — метальтрамафиты; 9 — диориты, кварцевые диориты, габбро-диориты, габбро; 10 — граниты; 11 — плагиомигматиты; 12 — мигматиты гранитные; 13 — карбонатный меланж; 14 — катаклазы, тектониты нерасчлененные; 15 — стратиграфические и интрузивные границы; 16 — тектонические нарушения. Цифры в кружочках — гранитные массивы: 1 — Ключевской; 2 — Варламовский; 3 — Котликский; 4 — Еремкинский; 5 — Борисовский; 6 — Санарский; 7 — Пластовский (Андреевский).

шпат. Два последних в расчетах не участвовали, так как они встречаются в тех или иных количествах во всех зонах и отнесены к разряду избыточных. Составы биотитов, роговой обманки, не содержащих включений других минералов, отвечают данным их химических анализов (табл. 1, 2), проверенных на микрозонде. Все другие минералы (гранат, ставролит, жедрит, кордиерит) проанализированы нами на рентгеноспектральном микроанализаторе. Расчетные химические реакции между сосуществующими метаморфическими минералами приведены в таблице 3. В результате было построено в различных координатах несколько мультисистем, отвечающих двум парагенезисам (скв. 111 и 15). На диаграмме (рис. 2) сплошными линиями нанесена часть мультисистем (другая половина на Кочкарской площади не реализована), рассчитанных по составам минералов пород скв. 111, штриховыми линиями — скв. 15. Сразу необходимо отметить, что равновесность минеральных ассоциаций не вызывает сомнений и подтверждается мелкозернистостью минералов, отсутствием порфириобластов и наложенных процессов. Что касается координатных осей, то выбраны они не случайно. Химические потенциалы воды и окиси кальция явились для данных парагенезисов вполне подвижными компонентами. Для кальция это доказывается резко зональным строением кристаллов граната [Сначёв, 2013]. В дальнейшем будет доказано, что метаморфические процессы в пределах Кочкарского антиклинория протекали во времени при явно падающей концентрации кальция в системе. Развертка мультисистем в координатах $\mu\text{H}_2\text{O} - \mu(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ или $\mu\text{H}_2\text{O} - \Delta V$ (объемный эффект реакций пропорционален давлению) не привела к нужному результату, ибо реакции в системе имели с данными осями угол, близкий к 90° , что говорит о незначительном участии давления и щелочей в метаморфическом процессе.

Обратимся к рис. 2. Достоинством предлагаемой диаграммы является то, что горизонтальная координатная ось ее — химический потенциал воды. Работами Д.С. Коржинского [1973] была доказана близкая к обратно пропорциональной связь химического потенциала воды и температуры, поэтому ось может быть использована и для температурных расчетов.

Рассматривая поля устойчивости отдельных минералов (биотита, граната, ставролита и др.) на диаграмме зависимости парагенезисов сланцевого комплекса Кочкарского антиклинория от химических потенциалов воды и окиси кальция, можно не только наметить критерии для выявления в них зональности, провести границу между ставролит-хлоритовой, ставролит-кордиеритовой и ставролит-жедритовой

Таблица 1

Состав, формулы метаморфических минералов и условия их образования

	СКВ. 15			СКВ. III			
	Би	Гр	Ст	Би	Гр	Ст	Ро
SiO ₂	39,24	35,90	28,60	40,25	36,45	27,62	35,20
TiO ₂	0,71	0,08	1,00	1,89	1,29	1,18	2,58
Al ₂ O ₃	17,80	20,00	53,17	15,10	18,97	53,91	4,85
Fe ₂ O ₃	10,42	3,20	0,60	10,47	6,71	2,03	17,58
FeO	10,02	30,10	13,80	9,32	29,15	12,26	8,00
MgO	9,78	2,57	1,25	8,30	3,17	1,49	9,38
MnO	0,24	1,59	0,31	0,19	0,14	0,22	0,28
CaO	0,53	5,76	0,98	0,52	2,69	1,01	10,56
Na ₂ O	0,30	—	—	0,43	—	—	1,22
K ₂ O	8,94	—	—	10,58	—	—	0,31
Сумма	98,00	99,20	99,71	97,05	98,57	99,72	89,91 п.п.п 9,97%
Si	3,00	2,92	4,00	3,22	3,00	3,87	5,96
Al ^{IV}	1,00	0,08	—	0,78	—	0,13	0,96
Al ^{VI}	0,60	1,83	8,76	0,64	1,85	8,75	—
Fe ⁺³	0,60	0,19	0,06	0,63	0,42	0,21	2,23
Fe ⁺²	0,64	2,04	1,61	0,62	2,01	1,43	1,13
Mg	1,11	0,31	0,26	0,99	0,39	0,31	2,36
Mn	0,01	0,11	0,04	0,01	0,01	0,03	0,04
Ti	0,04	0,01	0,11	0,11	0,08	0,12	0,32
Ca	0,04	0,50	0,15	0,04	0,23	0,15	1,91
Na	0,04	—	—	0,06	—	—	0,40
K	0,87	—	—	1,07	—	—	0,07
X _{Mg}	0,470	0,117	0,13	0,440	0,137	0,156	0,410
T, °C	550 580		610 590		610		
P, кбар	5,0 4,9		5,1 5,0		—		
Парагенезис	Би+Гр+Ст+Си+Ко+Кв			Би+Гр+Ст+Ро+Си+Кв+Пл			
Этап метаморфизма	Этап формирования гнейсовых куполов			Этап формирования гнейсовых куполов			

Таблица 2

Расчетная матрица мультисистем

Фазы	SiO ₂	AlO _{3/2}	FeO+FeO _{3/2}	CaO	H ₂ O
Биотит	1 3,22	1,42	1,25	0,04	0,08
	2 3,00	1,60	1,24	0,04	0,27
Гранат	1 3,00	1,85	2,43	0,23	0
	2 2,92	1,91	2,23	0,50	0
Ставролит	1 3,87	8,88	1,64	0,15	0,93
	2 4,00	8,76	1,67	0,15	0,16
Роговая обманка	1 5,96	0,96	3,36	1,91	1,96
	2 5,90	1,11	3,30	2,02	2,10
Кордиерит	1 4,94	4,02	0,40	0,08	0
	2 4,98	3,89	0,51	0	0
Жедрит	1 6,32	2,60	2,10	0,15	1,64
	2 6,27	2,53	2,25	0,10	1,51

Примечание: 1 — для скв. 111, 2 — для скв. 15.

фациями (по Федыкину [1975]), но и установить температурные условия их образования. Учитывая большое количество данных, полученных при изучении пород сланцевого комплекса, а именно: распределение кальция в гранатах; устойчивость граната (свыше 500°C), ставролита (ниже 625°C); условия полиморфного перехода кианит – силлиманит (575°C, 4 кбар); петрографические и термобарометрические исследования, процесс метаморфизма проходил близко к тому, как это показано на диаграмме линией 1–1. Метаморфизм пород Кочкарского антиклинория имел сложную историю (в предыдущей статье это хорошо обосновано) и шел, в общем, при постепенном росте температуры (прогрессивный этап метаморфизма) и последовательном падении химического потенциала окиси кальция. По мере роста температуры, т.е. с приближением к гранито-гнейсовым куполам, в сланцевом комплексе можно фиксировать (см. рис. 2) моменты появления в по-

Таблица 3

Расчетные химические реакции между сосуществующими минералами

Отсутствующие фазы		Расчетная реакция	α°
Же, Би	1	$33,6\text{Ст}+65,8\text{Ро}=106,9\text{Гр}+40,8\text{Ко}+16\text{Н}_2\text{О}+102\text{СаО}$	-57
	2	$28,7\text{Ст}+56,5\text{Ро}=97,6\text{Гр}+32,7\text{Ко}+151,9\text{Н}_2\text{О}+69,6\text{СаО}$	-65
Же, Ст	1	$1,9\text{Гр}+10,1\text{Ро}+8,6\text{Ко}=33,6\text{Би}+19\text{Н}_2\text{О}+19\text{СаО}$	-42
	2	$6,3\text{Гр}+5,5\text{Ро}+7,2\text{Ко}=28,7\text{Би}+3,7\text{Н}_2\text{О}+13\text{СаО}$	-16
Же, Ро	1	$65,8\text{Би}+10,1\text{Ст}+6,4\text{СаО}=35,9\text{Гр}+29\text{Ко}+14,6\text{Н}_2\text{О}$	66
	2	$56,5\text{Би}+5,5\text{Ст}+12,4\text{СаО}=30,9\text{Гр}+20,3\text{Ко}+21,6\text{Н}_2\text{О}$	60
Же, Ко	1	$40,8\text{Би}+24,9\text{Гр}+61,5\text{Н}_2\text{О}+49,3\text{СаО}=8,6\text{Ст}+29\text{Ро}$	-51
	2	$32,7\text{Би}+17,2\text{Гр}+42,1\text{Н}_2\text{О}+32,2\text{СаО}=7,2\text{Ст}+20,3\text{Ро}$	-53
Же, Гр	1	$1,9\text{Ст}+35,9\text{Ро}+24,9\text{Ко}=107\text{Би}+63,7\text{Н}_2\text{О}+66,53\text{СаО}$	-44
	2	$6,3\text{Ст}+30,9\text{Ро}+17,2\text{Ко}=97,6\text{Би}+45,7\text{Н}_2\text{О}+59,4\text{СаО}$	-38
Гр, Би	1	$5,6\text{Ст}+106,9\text{Же}+106,2\text{СаО}=61,6\text{Ро}+66,9\text{Ко}+60\text{Н}_2\text{О}$	29
	2	$3,7\text{Ст}+97,6\text{Же}+110,8\text{СаО}=60\text{Ро}+54,8\text{Ко}+25,8\text{Н}_2\text{О}$	13
Гр, Ро	1	$61,6\text{Би}+8,1\text{Ко}+56,7\text{Н}_2\text{О}+2,72\text{СаО}=3,0\text{Ст}+35,9\text{Же}$	-87
	2	$60\text{Би}+6,8\text{Ко}+36\text{Н}_2\text{О}+1,4\text{СаО}=5\text{Ст}+30,9\text{Же}$	-88
Гр, Ко	1	$2,5\text{Ст}+8,1\text{Ро}+24,9\text{Же}=66,9\text{Би}+53,8\text{Н}_2\text{О}+16,9\text{СаО}$	-72
	2	$4,2\text{Ст}+6,7\text{Ро}+17,2\text{Же}=54,8\text{Би}+30\text{Н}_2\text{О}+13,8\text{СаО}$	-64
Гр, Ст	1	$5,6\text{Би}+1,9\text{Же}+2,3\text{Н}_2\text{О}+5,3\text{СаО}=3,0\text{Ро}+2,5\text{Ко}$	-21
	2	$3,7\text{Би}+6,3\text{Же}+9,3\text{Н}_2\text{О}+0,05\text{СаО}=5\text{Ро}+4,2\text{Ко}$	-2

Примечание: 1 — для скв. 111, 2 — для скв. 15.

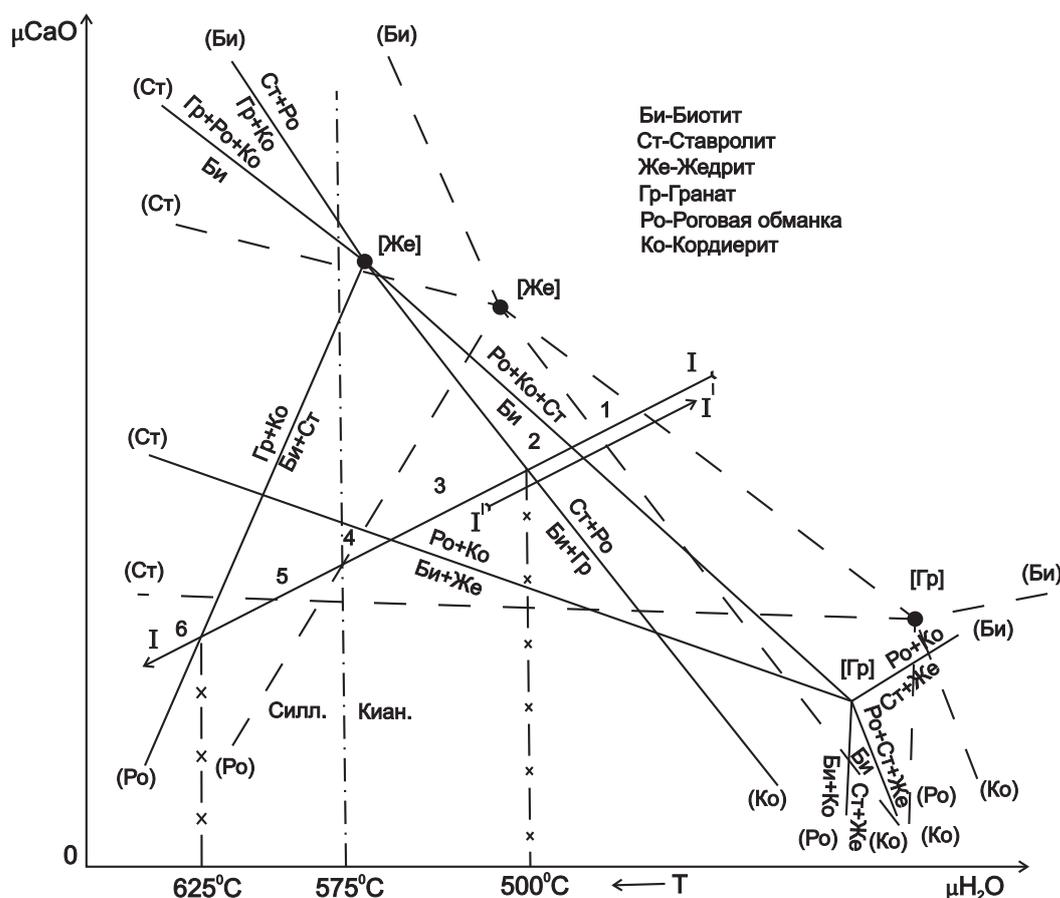


Рис. 2. Диаграмма зависимости парагенезисов сланцевого комплекса от температуры и химического потенциала СаО

роде биотита, затем граната, жедрита, исчезновения роговой обманки, появления вместо кианита силлиманита и, наконец, момент исчезновения ставролита. Необходимо отметить, что маломagneзиальный ставролит распадается при меньшей температуре.

Просмотр шлифов по имеющимся скважинам говорит о присутствии в подавляющем большинстве из них биотита, ставролита и реже граната, и что в породах, испытавших только региональный метаморфизм, встречен только кианит, а во всех других чаще присутствует силлиманит, чем кианит. Очень редко может быть и тот, и другой вместе. Только по этим данным можно уже с большой долей уверенности говорить об относительно высоких температурах преобразования пород сланцевого комплекса (500–625°C). Области 1 и 6 в этом случае не реализованы, поэтому для изучения зональности в метаморфическом комплексе необходимо учитывать моменты появления граната, жедрита, силлиманита. Причем устойчивость парагенезисов с жедритом, стабильных при температурах более 520°C [Ревердатто, 1970], при больших температурах полностью подчинена влиянию давления. На тех участках, где по каким-то причинам давление превысило 5,3–5,5 кбар, можно ожидать появление жедрита. Граница же между ставролит-хлоритовой и ставролит-кордиеритовой фациями должна проходить при температурах порядка 530–540°C [Федькин, 1975], т.е. близко к температуре перехода кианит – силлиманит. Использование силлиманита для фиксации перехода от одной фации к другой не вызывает сомнения из-за простоты его диагностики даже в образце. Подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующие выводы.

1. Метаморфический комплекс Кочкарского антиклинория сформировался в интервале температур порядка 500–625°C.

2. В составе комплекса можно выделить три фации: ставролит-хлоритовую (региональный метаморфизм), ставролит-кордиеритовую и ставролит-жедритовую (регионально-контактный метаморфизм), амфибол-роговиковую (контактный метаморфизм).

3. Границы между первой, второй и третьей фациями следует проводить, соответственно, по появлению силлиманита и жедрита.

Литература:

Болтыров В.Б. Каледоно-варисский цикл регионального метаморфизма палеозойской геосинклинали Урала // Геология метаморфических комплексов Урала. – Свердловск, 1973. – С. 11–27. – (Труды СГИ; Вып. 91).

Кейльман Г.А., Болтыров В.Б., Бурьян Ю.И., Горюжанкин В.Т. К вопросу о структурной эволюции Кочкарского антиклинория // Геология метаморфических комплексов Урала. – Свердловск, 1973. – С. 38–45. – (Тр. СГИ; Вып. 91).

Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. – М.: Наука, 1973. – 288 с.

Львов Б.К. Петрология, минералогия и геохимия гранитоидов Кочкарского района (Ю. Урал). – Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. – 164 с.

Ревердатто В.В. Фации контактового метаморфизма. – М.: Недра, 1970. – 272 с.

Сначёв А.В., Сначёв В.И., Рыкус М.В., Савельев Д.Е., Бажин Е.А., Ардисламов Ф.Р. Геология, петрогеохимия и рудоносность углеродистых отложений Южного Урала. – Уфа: ДизайнПресс, 2012. – 208 с.

Сначёв В.И. Геологическое строение, условия метаморфизма и зональность пород сланцевого комплекса Кочкарского антиклинория // Геол. сборник № 10 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПресс, 2013. – С. 36–43.

Федькин В.В. Ставролит. – М.: Наука, 1975. – 277 с.

Сведения об авторе:

Сначёв Владимир Иванович, Институт геологии Уфимского научного центра Российской академии наук (ИГ УНЦ РАН), г. Уфа. E-mail: SAVant@inbox.ru.

CONDITIONS OF FORMATION AND ZONIN OF METAMORPHIC ROCKS OF THE KOCHKAR ANTICLINORIUM (EASTERN URAL UPLIFT)

V.I. Snachev

Snachev Vladimir Ivanovich, Institute of geology of the Ufiman scientific centre (IG USC RAS), Ufa, Russia. E-mail: SAVant@inbox.ru.

Abstract. In this paper, based on the chemical and microprobe analyzes of metamorphic minerals of slate complex of the Kochkar anticlinorium and also data on parageneses mathematically calculated after method of D.S. Korzhinskiy, a set of physico-chemical parameters of metamorphism was established; staurolite-chlorite, staurolite-cordierite-staurolite and gedrite facies of regional metamorphism were determined; minerals were identified, appearance and disappearance of which should be the indication of boundaries between these facies.

Keywords: Kochkarsk anticlinorium, metamorphism, shale, parageneses, mineral.