

**ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВЫ МЕТАКАРБОНАТНЫХ ПОРОД
В УСЛОВИЯХ РЕГИОНАЛЬНОГО МЕТАМОРФИЗМА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ
ПО КЛАССИФИКАЦИИ**

О.М. Розен, Д. Феттес*, Ж. Десмон**

Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

** British Geological Survey, Murchison House, West Mains Road, Edinburgh EH9 3LA, Great Britain*

*** rue de Houdemont, 3, F-54500, Vandoeuvre-les-Nancy, France*

Представлены и проинтерпретированы данные по химическому и минеральному составам метаморфических карбонатных пород от зеленосланцевой до гранулитовой фаций в возрастном интервале архей—ранний палеозой. Обнаружен непрерывный ряд от чисто карбонатных до почти бескарбонатных пород, осадочный протолит которых был обогащен кальцием. Выявлены определенные группы метакарбонатных пород (петротипы), разделенные статистически-значимыми границами. Эти границы предложены в качестве основы для составления схемы номенклатуры метакарбонатных пород для включения в общую классификацию, подготавливаемую Подкомиссией по систематике метаморфических пород в составе Комиссии по систематике в петрологии Международного союза геологических наук (SCMR CSP IUGS).

Карбонатные породы, метаморфизм, систематика метаморфических пород.

**CHEMICAL AND MINERAL COMPOSITIONS OF METACARBONATE ROCKS UNDER
REGIONAL METAMORPHISM CONDITIONS AND GUIDELINES ON ROCK CLASSIFICATION**

O.M. Rosen, D. Fettes, and J. Desmons

Analysis is given to data on the chemical and mineral compositions of Archean—Early Paleozoic metamorphic carbonate rocks of greenschist to granulite facies. A continuous series of pure carbonate to nearly carbonate-free rocks derived from calcium-enriched sedimentary protolith has been revealed. Several groups of metacarbonate rocks (petrotypes) with statistically significant boundaries between them have been recognized. The boundaries are used as a basis for a systematic scheme of metacarbonate rock nomenclature proposed by the Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR), a branch of the Commission on Systematics in Petrology (CSP) of the International Union of Geological Sciences (IUGS).

Carbonate rocks, metamorphism, systematics of metamorphic rocks

ВВЕДЕНИЕ

Среди метаморфических комплексов широко распространены карбонатные, силикатно-карбонатные и карбонатно-силикатные породы [1], обозначенные в данной статье как метакарбонатные породы. Они — продукт регионального и контактового метаморфизма, а также метасоматизма. Наряду с широко распространенными кальцитовыми и доломитовыми разновидностями к таким породам относятся также железистые и высокомагнезиальные карбонатные породы: соответственно сидериты (породы) и магнезиты (породы), обнаруживающие признаки метаморфизма зеленосланцевой [2, 3] и амфиболитовой до гранулитовой фаций [1, 4]. В контактовых зонах метакарбонатные породы участвуют в строении узких, шириной в несколько километров, ореолов роговиков, образующихся вокруг интрузивных тел при сравнительно низких давлениях и относительно высоких температурах [5, 6]. В метасоматических ареалах, представленных большей частью скарнами и занимающих площадь до нескольких квадратных километров, метакарбонатные породы обычно обнаруживают зональность в минеральных парагенезисах: от полиминеральных составов во внешней части, к более простым ассоциациям, вплоть до мономинеральных, во внутренних зонах [7]. Систематика метакарбонатных пород, образовавшихся в условиях контактового метаморфизма и метасоматизма, представляет собой вполне самостоятельный объект и далее не обсуждается.

В данной работе рассматриваются метакарбонатные породы, распространенные в ареалах регионального метаморфизма, где они представлены не менее широко, чем другие хорошо изученные породы,

Таблица 1. Изменение минерального состава карбонатных граувакк при прогрессивном метаморфизме, по [8]

Зона метаморфизма	Минеральные группы и минералы, об.%							Кол-во образцов	Название породы**
	C*	PL*	Pl	CRB*	M*	Vt	QTZ*		
<i>Зеленосланцевая фация</i>									
Анкеритовая	0,0	25,1	25,1	27,1	15,7	0,0	30,8	} 21	Мусковит-хлорит-карбонатный сланец » Карбонатно-биотитовый сланец
Нижняя биотитовая	0,0	27,7	27,7	21,3	17,9	0,0	30,7		
Верхняя биотитовая	0,0	27,6	27,6	12,7	23,0	17,7	35,1		
<i>Амфиболитовая фация</i>									
Амфиболовая	5,9	32,4	32,4	6,1	15,9	14,8	37,2	7	Карбонат-амфибол-биотитовый сланец Карбонат-цоизитовая порода Карбонат-цоизит-клинопироксеновая порода
Цоизитовая	15,2	28,0	15,8	10,6	3,2	3,1	38,6	25	
Диопсидовая	17,0	30,8	18,4	11,2	0,3	0,3	38,4	48	

Примечание. Расшифровку обозначений минералов см. в табл. 2.

*Минеральная группа: C = Crx + Amf; PL = Pl + Zo + Kfs + Scp; CRB = Cc + Ank (анкерит присутствует только в Анк- и Vt-зонах); M = Ms + Chl + Vt; QTZ = кварц.

** Плаггиоклаз и кварц присутствуют во всех типах пород и не включены в название.

Таблица 2. Средний химический и минеральный составы метакарбонатных пород

Компонент	Подразделения пород и их границы по содержанию карбонатных минералов, мас.%							
	Мрамор	Силикатный мрамор			Карбонатно-силикатная порода			Известково-силикатная порода**
	95—100	85—95	70—85	50—70	30—50	15—30	5—15	0—5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Средний химический состав, мас.%</i>								
SiO ₂	2,66	4,15	9,26	18,93	31,62	42,04	50,89	55,39
TiO ₂	0,08	0,05	0,12	0,22	0,38	0,57	0,46	0,62
Al ₂ O ₃	2,59	1,19	2,01	4,11	6,51	11,35	11,38	13,05
Fe ₂ O ₃	0,24	0,21	0,58	0,78	1,09	0,97	0,92	2,32
FeO	0,14	0,57	0,97	1,54	2,25	4,07	3,83	3,81
MnO	0,01	0,06	0,06	0,06	0,07	0,1	0,08	0,26
MgO	10,84	2,77	4,01	6,11	6,12	6,38	6,57	5,44
CaO	40,50	49,38	44,19	37,3	29,91	19,66	15,82	13,92
Na ₂ O	0,13	0,2	0,24	0,61	0,79	2,14	2,37	2,42
K ₂ O	0,17	0,22	0,46	0,99	1,18	1,69	2,41	1,54
P ₂ O ₅	0,03	0,02	0,04	0,06	0,1	0,12	0,11	0,15
П.п.п.	42,31	40,88	37,34	29,01	19,69	10,74	5,29	1,72
Сумма	99,71	99,74	99,26	99,85	99,7	99,99	100,07	99,97
CO ₂	43,77	39,51	34,71	27,13	18,06	9,44	3,85	0,78
CaCO ₃	78,23	84,61	72,13	53,08	34,87	15,81	6,05	1,15
MgCO ₃	17,96	4,42	5,74	7,27	5,24	4,77	2,29	0,41
ΣCrb	96,20	89,03	77,86	60,35	40,1	20,58	8,33	1,55
n	4	26	24	96	15	33	38	125
n, %	1,11	7,20	6,65	26,59	4,16	9,14	10,53	34,63
N	1	4	4	5	3	6	8	12
<i>Средний модальный минеральный состав, об.%</i>								
C*	0	0	2,4	11,5	8,6	33,8	31,1	28,7
Crx	0	0	2,4	11,2	3,2	30,5	0—50,0	27,8
Hbl	0	0	0	0—2	5,4	7,1	0—6,9	0—9,3
M*	0	4,1	3,7	3,3	13,2	12,8	1,8	0—3,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Olv	0	0	0—2,8	0—0,9	0,0	0,0	0	0
Bt, Phl	0	4,1	0,6—4,0	0,5—5,2	13,2	0—36,7	0—4,4	0—3,0
PL*	5,0	3,6	4,05	15,9	33,4	30,9	51,9	56,3
Pl	4,0	3,6	0,1—5,0	0—8,1	27,2	0—1,5	0—28,0	25,9
Scp	0	0	0—2,9	11,1	6,2	19,8	0—52	0—29,0
Kfs	1,0	0	0—0,2	0,0	0,0	0,0	0—21,0	0—0,96
QTZ*	0	0	0	0—11,4	0,0	0,0	0—32,6	0—25,5
CRB*	93,1	91,8	89,25	61,1	40,8	14,8	6,4	1,1
Cc	49,0	91,8	76,8	60,4	40,8	0,9	0—12,0	0—3,7
Dl	44,1	0	0—24,8	0—2,3	0,0	0,0	0	0
<i>nm</i>	1	1	13	43	7	16	22	36
<i>N</i>	1	1	2	2	1	3	4	6
Лит. источник	[20]	[15, 18—21]	[18—22]	[15, 18—22]	[18—22]	[11, 12, 16, 18—22]	[8, 11—14, 16, 18—22]	[9—22]

Примечание. Литературный источник и количество использованных анализов: [8] 115; [9] 14; [10] 6; [11] 15; [12, 14] 17; [13] 5; [15] 13; [16] 8; [17] 3; [18—21] 154; [22] 37.

Здесь и по всей статье: Ab — альбит; Amf — амфибол; Bt — биотит; Cc — кальцит; Chl — хлорит; Cpx — клинопироксен; Dl — доломит; Ep — эпидот; Grs — гроссуляр; Grt — гранат; Hbl — роговая обманка; Kfs — калиевый полевой шпат; Lc — лейцит; Mgs — магнезит; Ms — мусковит; Olv — оливин; Орх — ортопироксен; Phl — флогопит; Pl — плагиоклаз; Qtz — кварц; Scp — скаполит; Wo — волластонит; Zo — цоизит. *n* — кол-во единичных силикатных анализов, *n*, % — процент от суммы значений *n*, составляющей 361 анализ. Для некоторых регионов опубликованы только средние составы (включены в таблицу как единичные анализы), а общее число проб, охарактеризованных выборкой анализов, составляет 387; *N* — кол-во исследованных регионов; *nm* — кол-во единичных модальных минеральных анализов; Σ Crb — содержания карбонатных минералов как сумма CaCO₃ и MgCO₃, рассчитанная, исходя из содержания CO₂ в соответствии с отношением CaO/MgO в валовом анализе. Если содержание углекислоты не определялось (около 1/4 всех анализов), то кол-во CO₂ рассчитывалось по потерям при прокаливании в соответствии с уравнением CO₂ = 0,81·П.п.п., мас.%, где значение 0,81 получено из уравнения линейной регрессии с коэффициентом корреляции *r* = 0,96.

* Группы модальных минералов: C = Cpx + Amf; M = Olv + Bt + Phl + Ms + Chl; QTZ = Qtz; CRB = Cc + Dol; PL = Pl + Scp + Kfs. Последняя группа также иногда включает 0—30 об.% Zo, Ep + Grs в известково-силикатных породах, а также 0—43 об.% лазурита, 0—8,6 об.% нефелина и 0—2,3 об.% содалита в породах с содержаниями карбонатных минералов 0—30 об.%.

** Включая карбонатсодержащие силикатные породы.

например, метабазиты. Хотя по этим метакарбонатным породам опубликовано множество данных, однако до сих пор не предпринято их обобщение, которое можно было бы использовать для разработки классификации. Нами представлены данные по химическому и минеральному составам широкого спектра этих пород (табл. 1, 2), частично рассмотренные ранее [23].

Задача статьи — систематизация петрохимических и количественно-минералогических данных по метакарбонатным породам в регионально-метаморфических комплексах на основе собранной базы данных; выявление статистически-значимых групп и мотивировка предложения по систематике метакарбонатных пород, формирующихся в условиях регионального метаморфизма, что является дальнейшим развитием разработанной ранее классификации метаморфических пород [24].

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И СУЩЕСТВУЮЩАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Рассматриваемые породы участвуют в строении разрезов литологически разнообразных отложений, включавших первично-карбонатные осадки, которые варьируют по составу от чисто карбонатных до терригенных отложений с примесью карбонатного материала. Например, ассоциация кинцигитов, полевошпатовых и диопсидовых гнейсов, скаполит-диопсидовых амфиболитов и мраморов описана как толща, сложенная пелитами, псаммитами, смешанными карбонатно-терригенными породами и известняками [16]. Исследованы метакарбонатные толщи, которые образовались за счет кальцитовых или доломитовых мергелей, карбонатных песчаников и аргиллитов, а также карбонатных граувакк [8, 12, 20]. В составе некоторых метакарбонатных пород присутствуют такие минералы, как нефелин, лазурит, содалит, а также сульфат- и хлорсодержащий скаполит, и образуются сложные псевдоморфозы по галиту, что свидетельствует, как предполагают, об их образовании за счет соленосных доломит-аргиллитовых толщ в условиях глубокого метаморфизма [11, 15, 25].

Метакарбонатные породы образуют петрологически единую, хотя и сложную группу. Широкие вариации в соотношениях карбонатного и силикатного компонентов в исходном субстрате определяют большое разнообразие минеральных ассоциаций, возникающих при метаморфизме, что крайне затрудняет разработку классификации. Используемая в литературе терминология несогласованна, варьирует в зависимости от предпочтений авторов и специфики регионов исследования, и пока неизвестны попытки общей и систематической минералогической классификации рассматриваемых пород. Например, в единой метакарбонатной толще амфиболитовой фации метаморфизма выделяются *мраморы*, содержащие > 50 % кальцита, *пироксен-скаполитовые гнейсы* — 1—15 % кальцита, *карбонат-силикатные гнейсы* — 1—41 % кальцита, *параамфиболиты* — 1—21 % кальцита [22]; для гранулитовой фации разработано другое разделение: *мрамор*, содержание карбонатов 85—100 %; *кальцифир*, 15—85 %, *известково-силикатная порода*, менее 15 % карбонатов [20]. Особенно разнообразна терминология пород, содержащих <50 % карбонатов. Такие породы именовались как известковые гранулиты [17]; диопсидовые гнейсы или скаполит-диопсидовые амфиболиты [16]; карбонатные слюдяные сланцы, калишпат-пироксеновые гнейсы, скаполитовые пироксениты [12, 13]; известково-силикатные породы и(или) гнейсы [9, 21] и т. п. Во многих регионах описана прогрессивная метаморфическая зональность. Вариации содержаний минералов при переходе от зеленосланцевой к амфиболитовой фации приведены в табл. 1 на примере раннепалеозойских карбонатных граувакк по данным [8], сходная зональность описана для зеленокаменных поясов архея [26]. При этом проявляется важная для классификации особенность изменения структуры, а именно, сланцеватость пропадает с исчезновением слоистых силикатов. Согласно принятым подкомиссией критериям структура определяется как сланцеватая, когда содержание ориентированных слоистых силикатов и других пластинчатых минералов превышает 50 об.%, и в этом случае порода определяется как карбонатный сланец. При нарастании степени метаморфизма на смену сланцеватой структуре приходят гнейсовидная, когда плоскостная ориентировка выражена слабо, и массивная (гранофельзовая), если такая ориентировка не выражена вообще. Это позволяет использовать корневые термины (сланец, гнейс, гранофельз) с приставками, определяющими минеральный состав [27], например, карбонат-биотит-плагиоклаз-пироксеновый гнейс.

ХИМИЧЕСКИЙ И МОДАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНЫЕ СОСТАВЫ: ЧАСТОТА ВСТРЕЧАЕМОСТИ ПЕТРОТИПОВ

Для разработки основы систематики карбонатных пород, претерпевших региональный метаморфизм, была собрана база данных из 387 опубликованных в литературе валовых химических анализов, частично представленных в виде средних и сопровождаемых по большей части сведениями о наблюдаемом (модальном) количественно-минеральном составе (см. табл. 2). Они характеризуют архейские, протерозойские и палеозойские толщи, метаморфизованные в условиях гранулитовой, амфиболитовой и зеленосланцевой фаций, а также — постепенные переходы от зеленосланцевой к амфиболитовой фации. Эти данные, по-видимому, достаточно представительны для системной характеристики всех разновидностей метакарбонатных пород (от бессиликатных и до почти бескарбонатных) и для разработки их классификации на основе комбинации содержаний модальных минералов и валового химического состава.

Содержания карбонатных минералов приняты за основу систематики, поскольку они позволяют наиболее эффективно осуществлять визуальную классификацию пород в образцах на основе содержаний минералов в объемных процентах, как того требуют правила, разработанные подкомиссией [27]. Соответствующая согласованная оценка содержаний была проведена для всей совокупности образцов, входящих в базу данных. Авторы оригинальных работ использовали разные методы оценки количественно-минерального состава, такие как подсчет по точкам в петрографических шлифах, рентгенодифрактометрический анализ или интерпретация валового химического анализа. Единообразной и согласованной оценки удалось достичь путем расчета содержаний CaCO_3 и MgCO_3 (в мас.%), исходя из содержаний CO_2 и отношения CaO/MgO в валовом составе (см. табл. 2). По содержаниям карбонатов все образцы были разделены на восемь градаций (петротипов), для которых вычислены средние модальные составы (*nm*). Границы между петротипами показаны на рис. 1. Они выражены в мас.%, что отличается от оценок в об.% не более чем на 1,58 об.% (рис. 1). Таким различием можно пренебречь, имея в виду визуальную классификационную диагностику пород непосредственно в образцах в соответствии с рекомендациями подкомиссии. О достаточной достоверности проведенного выделения петротипов свидетельствует хорошая сходимость содержаний модальных карбонатов и рассчитанных сумм карбонатных минералов (см. табл. 2).

Средние химические составы, взятые вместе, показывают, что метакарбонатные породы образуют непрерывный спектр составов и несмотря на большие визуальные различия в минеральных составах между отдельными разновидностями все рассматриваемые породы образуют единое семейство.

Количество образцов каждого петротипа (см. табл. 2, величина *n*, %), как можно предполагать, статистически отражает их распространенность. Мраморов оказывается значительно меньше (41,5 %),

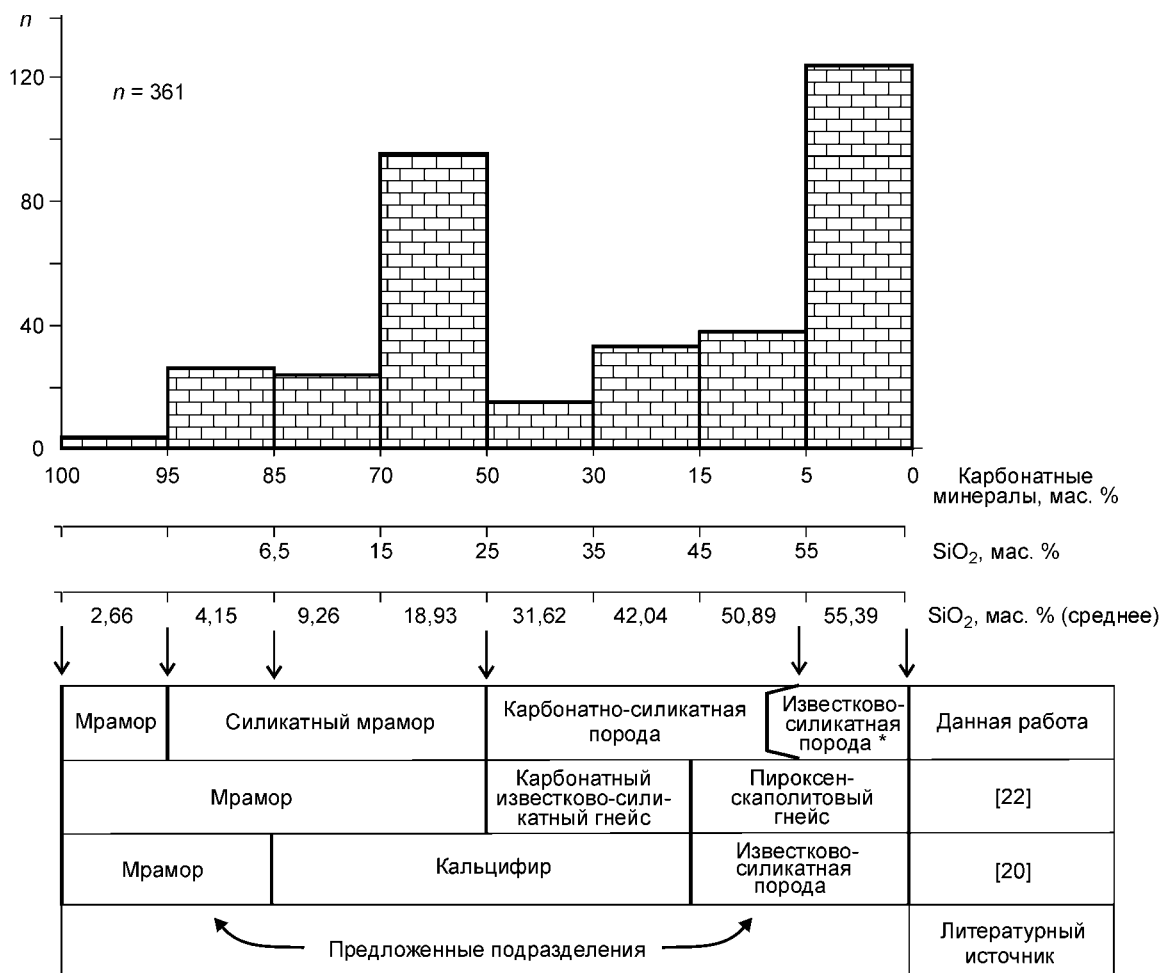


Рис. 1. Частота встречаемости метакarbonатных пород в зависимости от содержаний carbonатных минералов и концентраций кремнекислоты (см. табл. 2) в сопоставлении с некоторыми классификационными схемами, предложенными ранее.

Содержания carbonатных минералов, показанные на диаграмме в мас.%, незначительно отличаются от объемных величин (например, 95; 50; 5 мас.% и соответственно равны 95,29; 51,58; 5,31 об.%), что позволяет применять их для классификации в соответствии с рекомендацией подкомиссии (пояснения в тексте). Для расчета принят в соответствии с табл. 2 состав carbonата $2CaCO_3 \cdot MgCO_3$ и силикатов $Sr_x/Pl = 1$, с формулами $1CaMgSi_2O_6 \cdot 1CaFeSi_2O_6$ и $1NaAlSi_3O_8 \cdot 1CaAl_2Si_2O_8$ при средних плотностях carbonата, клинопироксена, плагиоклаза соответственно 2,81; 3,39; 2,69 г·см⁻³.

* Включая carbonатсодержащие силикатные породы.

чем carbonатно-силикатных пород (58,5 %), что примерно соответствует соотношениям соответствующих протолитов в carbonатно-терригенных бассейнах осадконакопления.

Частоты встречаемости петротипов обнаруживают граничные содержания carbonатных минералов в 95, 50, 5 мас.%, которые являются статистически наиболее значимыми в имеющейся базе данных (см. рис. 1). Граница в 50 % содержаний carbonатных минералов естественно разделяет две главные группы, а именно, мраморы и carbonатно-силикатные породы. Значение > 95 % отделяет чистые или почти бессиликатные мраморы от загрязненных, силикатных мраморов (кальцифиров), а величина < 5 % отделяет carbonатно-силикатные породы от carbonатсодержащих силикатных пород и известково-силикатных, в которых преобладают Ca-обогащенные минералы.

Широкое разнообразие модальных минеральных составов можно упростить для дальнейшего обсуждения путем введения относительно однородных групп минералов. Это группа: carbonатов (группа **CRB**), полевошпатовая (**PL**, в основном плагиоклаз), клинопироксеновая (**C**, преимущественно клинопироксен), свободного кремнезема (**QTZ**, кварц) и прочих преимущественно Mg-Fe-обогащенных минералов (**M**, главным образом оливин и флогопит).

Во всех петротипах содержание (мас.%) оксида кальция существенно выше оксида магния, а CaO/MgO оказывается > 2, тогда как в доломитах оно составляет $\leq 1,39$. Очевидно, что при метаморфизме силикатные

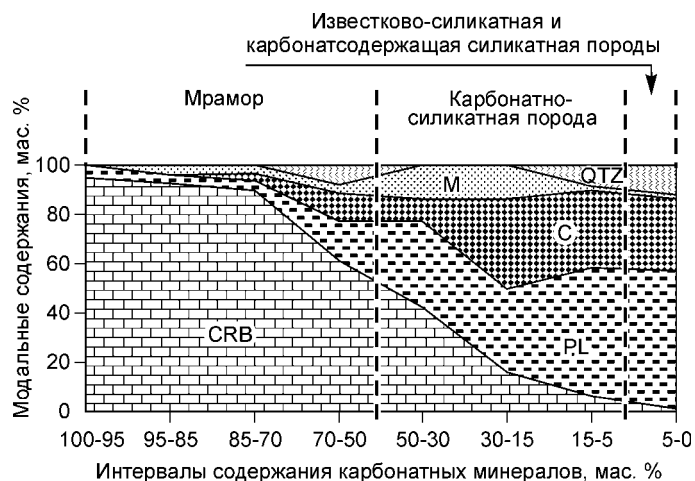


Рис. 2. Средние модальные минеральные составы метакarbonатных пород в зависимости от содержания карбонатных минералов.

Состав минеральных групп (C; PL; CRB; M; QTZ) и их содержание см. в табл. 2.

минералы формировались в условиях избытка кальция. Результатом таких условий явилось преобладание Ca-обогащенных минералов среди силикатной составляющей, и минеральные группы C и PL составляют 70—100 % в модальном составе некарбонатной части всех рассматриваемых пород (рис. 2). Оливин (форстерит) и флогопит, ассоциированные со шпинелью, характерны для пород с низким содержанием кремнезема,

тогда как в породах с высоким его содержанием обычно присутствует кварц (см. табл. 2, лит. источник). Последние большей частью сложены клинопироксеном и плагиоклазом в сопровождении таких аксессуаров, как циркон, апатит, оксиды железа и иногда графит и сульфиды. Аксессуарный титанит присутствует во всех типах пород. Сравнительно редкие типы метакarbonатных пород, обогащенные щелочными металлами, содержат нефелин, лазурит и содалит, составляющие иногда до 30 об.% в карбонатно- и известково-силикатных породах (см. табл. 2).

В качестве одного из наиболее распространенных типов протолитов для карбонатно-силикатных пород наряду с карбонатными граувакками, о которых сказано выше, выступают мергели. Как показывает расчет, приведенный в табл. 3, метаморфизованный до диопсидовой ступени мергель вследствие реакций

Таблица 3. Вероятный минеральный состав мергелей в условиях глубокого метаморфизма, мас. %

Компонент	Химический состав мергелей	
	1	2
SiO ₂	22,31	51,76
TiO ₂	0,00	0,84
Al ₂ O ₃	9,22	13,77
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00
FeO	2,95	4,10
MnO	4,57	0,10
MgO	2,90	2,74
CaO	31,02	11,59
Na ₂ O	0,00	0,65
K ₂ O	0,00	3,87
P ₂ O ₅	0,09	0,70
CO ₂	26,93	9,89
Кальцит*	55,36	17,42
Доломит*	4,97	1,52
<i>Рассчитанный минеральный состав метаморфических карбонатных пород</i>		
Карбонаты	47,00	7,07
Плагиоклаз	33,74	38,16
Калишпат	0,0	22,35
Клинопироксен	13,92	28,55
Оливин	5,27	0,0
Кварц	0,0	3,39

Примечание. 1 — по [28, табл. 8—11]; 2 — по [29, табл. 84]. Расчет выполнен для минералов системы CIPW в предположении, что реакции декарбонатизации приводят к образованию в метаморфической породе Crx, Olv, Pl, Qtz при частичной сохранности карбонатных минералов.

* Рассчитано по CO₂ пропорционально содержаниям CaO и MgO.

декарбонизации теряет значительную часть углекислоты и содержание карбонатных минералов снижается, например, с 60 до 47 мас.%, а в другом случае — с 19 до 7 мас.%. Полученный минеральный состав по содержаниям карбонатов, полевых шпатов и клинопироксена соответствует карбонатно-силикатным породам. В целом протолитами мраморов, по-видимому, были известняки и(или) известковые доломиты с небольшой долей терригенной, песчаной или глинистой примеси. Карбонатно-силикатные породы (5—50 % карбонатов) имели смешанный протолит, такой как мергели, карбонатные аргиллиты и карбонатные песчаники (например карбонатные граувакки, о которых сказано выше), а также карбонатно-туфогенные отложения. Карбонатсодержащие силикатные и известково-силикатные породы с концентрациями реликтовых карбонатных минералов менее 5 об.% содержали, очевидно, лишь небольшую долю карбонатов в терригенном протолите.

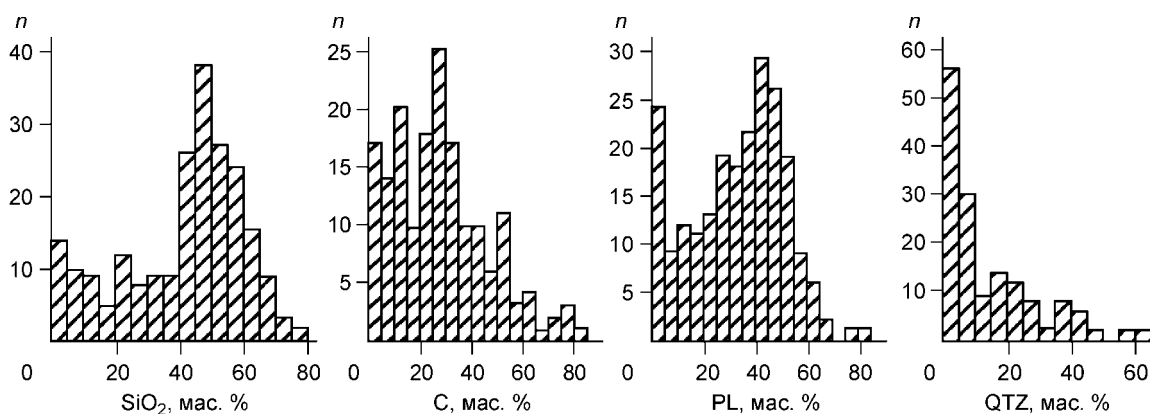
НОРМАТИВНЫЙ МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ: СТАТИСТИКА И ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ГРАНИЦЫ

Имеющаяся база данных по валовым химическим анализам позволяет провести статистический анализ, используя интервал 5 мас.% SiO_2 , и получить более детальный обзор, по сравнению с использованным в табл. 2. Рассчитанные в системе CIPW нормативные минералы (мас.% [30]) объединены в минеральные группы, подобные использованным выше ($C = \text{Cpx} + \text{Wo}$; $M = \text{Olv} + \text{Orx}$; $\text{PL} = \text{Ab} + \text{An} + \text{Kfs} + \text{Lc} + \text{Nepheline}$; $\text{CRB} = \text{Cc} + \text{Mgs}$; $\text{QTZ} = \text{Qtz}$). Частоты распределения кремнезема и содержания нормативных минералов определены для 221 анализа, которые в качестве единичных частично включают средние, вычисленные рядом авторов для отдельных регионов, а в целом характеризуют 387 образцов использованной базы данных. Содержания нормативных минералов удовлетворительно соответствуют модальным с коэффициентом корреляции $r = 0,7$, рассчитанным для 79 пар из групп C и PL.

Являясь независимым средством контроля сделанных выше заключений, полученное частотное распределение компонентов (рис. 3) достаточно хорошо согласуется с распределением модальных составов (см. рис. 1, 2).

Преобладающие величины содержаний $\text{SiO}_2 = 40\text{—}60$ мас.% соответствуют наиболее широко распространенным карбонатсодержащим силикатным породам и известково-силикатным породам с небольшим содержанием карбонатов. Наиболее распространенные значения для минералов группы клинопироксена (C) составляют 20—35 и 0—15 мас. %, а для плагиоклаза (PL) — 25—55 и 0—5 мас. %. Это показывает, что рассматриваемые метакарбонатные породы включают два главных типа, а именно, мраморы с низкими содержаниями Ca-обогащенных минералов (минеральные группы C и PL) и породы с высокими их содержаниями (карбонатно-силикатные, карбонатсодержащие силикатные и известково-силикатные породы). Нормативный кварц (группа QTZ) нередко составляет 20—40 мас.%, что соответствует карбонатным и карбонатсодержащим силикатным породам, в редких типах пород его содержания могут достигать 60 мас.%, а в большинстве случаев он отсутствует.

Постепенное обогащение кремнеземсодержащими минералами отражает переход от метакарбонатных к другим метаморфическим породам. Граница может быть определена по максимальному количеству — это 35 мас. % обогащенных кальцием минералов группы клинопироксена (C) и 50 % — группы плагиоклаза (PL) в составе известково-силикатных пород. Первое количество отделяет метакарбонатные породы от метамафических, а второе — от пород, богатых полевыми шпатами.



**Рис. 3. Частота встречаемости содержаний SiO_2 и нормативных CIPW-минеральных групп в метакарбонатных породах, мас.%.
Пояснения в тексте.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержания карбонатных минералов являются предпочтительным базисом для разработки классификации метакарбонатных пород, поскольку они являются наблюдаемым и поддающимся количественной оценке признаком при макроскопической диагностике породы в образце, как это предусматривают согласованные правила, выработанные Подкомиссией по систематике метаморфических пород [26].

На основе использованной базы данных сопоставлены практически все известные вариации модальных минеральных и валовых химических составов рассматриваемых пород. Средние модальные содержания минералов в сопоставлении с химическими составами позволяют предложить основные положения для систематики метакарбонатных пород.

1. Многообразие метакарбонатных пород. Метакарбонатные породы составляют обширную и сложную группу от чисто карбонатных до почти бескарбонатных разновидностей. Они образовались за счет отложений седиментационных бассейнов, претерпевших метаморфизм, близкий к изохимическому. Известняки и доломиты были предшественниками мраморов. Карбонатсодержащие песчаники, аргиллиты, мергели, а также туфогенные и эвапоритовые отложения служили протолитами для карбонатно-силикатных пород и карбонатсодержащих силикатных и известково-силикатных пород. Последние существенно силикатные разновидности представлены значительно шире, чем мраморы, что соответствует относительной распространенности протолитов в осадочных бассейнах.

Карбонатно-силикатные породы связаны постепенными литологическими и минералогическими переходами с карбонатсодержащими силикатными породами и с известково-силикатными породами, а последние — со многими разновидностями силикатных пород, таких как кварциты, лейкократовые гнейсы и метамафиты.

2. Подразделения метакарбонатных пород. Главные рекомендуемые подразделения для метаморфизованных карбонатных пород представляются в следующем виде.

Мраморы, 50—100 % карбонатных минералов (кальцит, доломит, арагонит), включая собственно мраморы (0—5 % силикатных минералов) и силикатные мраморы, 5—50 % силикатных минералов (кальцифиры).

Карбонатно-силикатные породы, 5—50 % карбонатных минералов.

Карбонатсодержащие силикатные породы, 0—5 % карбонатных минералов.

Известково-силикатные породы, 0—5 % карбонатных минералов и более чем 50 % силикатов представлены Са-обогащенными минералами (известковый плагиоклаз, скаполит, волластонит, клинопироксен, гроссуляр, везувиан, цоизит, пумпеллиит, пренит, ломонтит, лавсонит).

Сидериты и магнезиты (породы) следует обозначать составными названиями, включающими корневой структурный термин и префикс, отражающий минеральный состав в соответствии с согласованными правилами, выработанными подкомиссией по систематике метаморфических пород [26].

3. Структурные вариации. Присутствие или отсутствие ориентированных слоистых силикатов (слюд, хлоритов) и пластинчатых минералов определяет структурный аспект систематики метакарбонатных пород, особенно в обстановке регионального метаморфизма. В зеленосланцевой фации метакарбонатные породы обогащены слоистыми силикатами, демонстрируют сланцеватую структуру и представлены обычно сланцеватыми хлорит-слюдяными мраморами или карбонат-хлорит-

сланцеватыми мраморами или карбонат-хлорит-

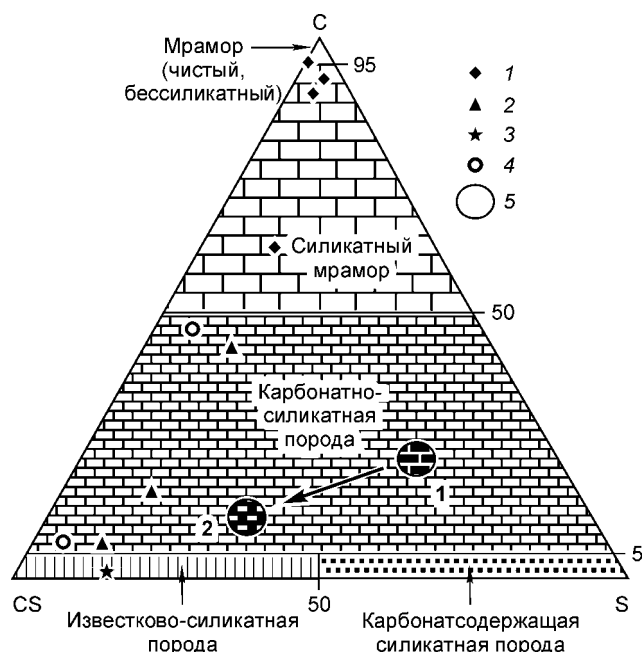


Рис. 4. Диагностическая диаграмма для метакарбонатных пород.

C — кальцит, доломит, арагонит; CS — Са-обогащенные минералы: плагиоклаз, скаполит, волластонит, клинопироксен, гроссуляр, везувиан, цоизит, пумпеллиит, пренит, ломонтит, лавсонит; S — прочие минералы: кварц, оливин, ортопироксен, амфибол, слюды, хлорит, тальк. Термин „порода“ включает структурные вариации: сланец, гнейс и гранофельз в соответствии с наблюдаемой сланцеватостью или планарной ориентировкой пластинчатых минералов.

1—3 — средние модальные минеральные составы (по данным табл. 2): 1 — мрамор, 2 — карбонатно-силикатная порода, 3 — известково-силикатная порода; 4 — метаморфизованный мергель (см. табл. 3); 5 — метаморфизованные карбонатные граувакки (по [8]). Цифрами обозначены: мусковит-хлорит-карбонатный сланец (1), который при прогрессивном метаморфизме превращается в карбонат-цоизит-клинопироксеновую карбонатно-силикатную породу, лишённую отчетливой сланцеватости (2).

сланцевыми сланцами. В амфиболитовой и гранулитовой фации слоистые силикаты постепенно распадаются. В этой ситуации мраморы и известково-силикатные породы, содержащие небольшие количества ориентированных пластинчатых минералов и слабо проявляющие сланцеватость, относятся к структурной категории гнейса (например гнейсовидный мрамор) или — если эти признаки отсутствуют, — гранофельза (например известково-силикатный гранофельз).

4. Границы с другими, некарбонатными, породами. По вариациям количественно-минерального состава мраморы постепенно переходят в карбонатно-силикатные и известково-силикатные породы, которые, в свою очередь, связаны переходами с другими метаморфитами, мафическими и фельзическими, а также с кварцитами. Краевые границы известково-силикатных пород и карбонатсодержащих силикатных пород можно наметить по максимальным содержаниям в них 35 мас. % минералов группы клинопироксена (С) и 50 мас. % — группы плагиоклаза (PL). Первая величина отделяет эти породы от метаморфизованных мафитов, а вторая — от полевошпатовых пород.

5. Классификационная диаграмма. На рис. 4 показаны разработанные в соответствии с правилами Подкомиссии по систематике метаморфических пород количественно-минеральные соотношения мраморов, карбонатно-силикатных, известково-силикатных и карбонатсодержащих силикатных пород. Для сопоставления приведен модальный состав петротипов метакарбонатных пород (см. табл. 2) и метаморфизованных мергелей (см. табл. 3). Охарактеризованы изменения классификационной позиции пород при прогрессивном региональном метаморфизме (тренд 1—2, по данным [8]). Карбонатно-терригенная порода в условиях зеленосланцевой фации превращается в карбонат-хлорит-сланцевый сланец. Он, попадая в условия амфиболитовой фации, превращается в плагиоклаз-клинопироксеновую карбонатно-силикатную породу (гнейс или гранофельз).

Изложенные в этой статье данные и выводы в форме предложений представлены в Подкомиссию по систематике метаморфических пород и доступны в интернете по адресу: Metacarbonate and related rocks. Provisional recommendations by the IUGS Subcommission on the systematics of metamorphic rocks. Web version of 1/1/2004. SCMR home page: <http://www.bgs.ac.uk/SCMR>.

Авторы благодарны за помощь, которую оказали Н.В. Аксаментова, В.З. Негруца, В.Т. Сафронов, В.Л. Злобин и все коллеги, участвовавшие в работе Рабочей группы по карбонатным породам. Различные версии определений главных терминов („мрамор“ и „известково-силикатная порода“ и др.) были предложены и скорректированы в процессе дискуссий Р. Шмидом и Э. Калегари. Н.Н. Перцев сделал ряд критических замечаний. Авторы признательны рецензентам Г.Г. Лепезину и Е.В. Склярову за полезные замечания и ценные рекомендации.

Исследование выполнено в рамках деятельности Подкомиссии по систематике метаморфических пород в составе Комиссии по систематике в петрологии Международного союза геологических наук (SCMR CSP IUGS) и поддержано Межведомственным петрографическим комитетом РАН и РФФИ (гранты 99-05-65154 и 02-05-64397).

ЛИТЕРАТУРА

1. Глебовицкий В.А., Добрецов Н.Л., Кориковский С.П., Розен О.М. Регионально-метаморфические породы // Классификация и номенклатура метаморфических горных пород: Справочное пособие / Под ред. Н.Л. Добрецова, О.А. Богатикова, О.М. Розена. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1992, с. 21—57.
2. Старостина З.М. Рифейская сидеритовая формация западного склона Южного Урала. М., Наука, 1962, 106 с.
3. Анфимов Л.В., Бусыгин Б.Д., Демина Л.Е. Магнетитовые руды Сатки, Южный Урал. М., Наука, 1983, 88 с.
4. Trendall A.F. and Morris R.C. Iron-formation facts and problems. Developments in Precambrian geology, V. 6. Amsterdam, Elsevier, 1983, 565 p.
5. Колобов В.Ю., Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Контактново-метаморфические породы // Классификация и номенклатура метаморфических горных пород: Справочное пособие / Под ред. Н.Л. Добрецова, О.А. Богатикова, О.М. Розена. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1992, с. 77—97.
6. Smulikowski W., Desmons J., Harte B. et al. Types, grade and facies // Towards a unified nomenclature of metamorphism. 2001. Home page <http://www.bgs.ac.uk/SCMR>.
7. Жариков В.А., Омеляненко Б.И., Перцев Н.Н. Систематика и номенклатура метасоматических пород // Классификация и номенклатура метаморфических горных пород: Справочное пособие / Под ред. Н.Л. Добрецова, О.А. Богатикова, О.М. Розена. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1992, с. 123—130.
8. Ferry J.M. Mineral reactions and element migration during metamorphism of calcareous sediments from the Vassalboro Formation, south-central Maine // Amer. Miner., 1983, v. 68, p. 334—354.

9. **Allen A.R.** Metasomatism of a depleted granulite facies terrain in the Arunta block, Central Australia // *Contr. Miner. Petrol.*, 1979, v. 71, p. 85—98.
10. **Baruah N.C.** Calc-silicate rocks of the Hahim area // *J. Mines, Metals and Fuels*, 1977, № 8, p. 245—248.
11. **Hoggarth D.D., Griffin W.L.** Lapis Lazuli from Baffin Island — a Precambrian metaevaporite // *Lithos*, 1978, v. 11, p. 37—60.
12. **Moine B.** Orthoamphibolites et formations metasedimentaries calco-magnesiens de la region d'Ambatofinandrahana (Madagascar), contribution au probleme de l'origine des amphibolites // *Sci. de la Terre*, 1969, v. XIV, № 2, p. 107—138.
13. **Moine B.** Heritage sedimentaire ou volcano- sedimentaire et echanges de matiere dans la formation des gneiss calco-magnesiens // *Bull. Soc. Geol. France, Ser. 7*, 1978, v. XX, № 1, p. 11—20.
14. **Moine B.** La recherche d'anciennes series evaporitiques dans les ensembles metamorphiques, methods et results // *Sci. de la Terre*, 1979, v. XXIII, № 2, p. 85—94.
15. **Ortega-Gutierrez F.** Evidence of Precambrian evaporites in the Oaxacan granulite complex of southern Mexico // *Precamb. Res.*, 1984, v. 23, p. 377—393.
16. **Parras K.** On the charnockites in the light of a highly metamorphic rock complex in Southern Finland // *Bull. Comm. Geol. Finland*, 1958, № 181, 136 p.
17. **Prasad U.** Geology and petrochemistry of a part of Hsatu-Belbathan polymetallic mineralized belt, Eastern Bihar // *Mem. Geol. Surv. India*, 1976, v. 107, 129 p.
18. **Розен О.М., Близначенко Л.М.** Докембрий Кокчетавского массива. Отчет по теме „Стратиграфия и корреляция докембрия Казахстана“. Караганда, Центрально-Казахстанское геологическое управление, 1967, 694 с.
19. **Розен О.М., Андреев В.П., Белов А.Н. и др.** Архей Анабарского щита и проблемы ранней эволюции Земли. М., Наука, 1988, 254 с.
20. **Розен О.М., Белов А.Н., Злобин В.Л.** Регионально-метаморфические породы Анабарского щита (пример разработки региональной классификации) // Классификация и номенклатура метаморфических горных пород: Справочное пособие / Под ред. Н.Л. Добрецова, О.А. Богатикова, О.М. Розена. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1992, с. 57—77.
21. **Condie K.C., Wilks M., Rosen O.M., and Zlobin V.L.** Geochemistry of metasediments from the Precambrian Napschan series, eastern Anabar shield, Siberia // *Precamb. Res.*, 1991, v. 45, p. 37—47.
22. **Van de Kamp P.C.** Geochemistry and origin of metasediments in the Haliburton-Madoc area, southwestern Ontario // *Canad. J. Earth Sci.*, 1968, v. 5, № 6, p. 1337—1372.
23. **Розен О.М.** Состав метаморфизованных карбонатных пород и опыт их систематики // *Докл. РАН*, 1996, т. 346, № 1, с. 87—90.
24. **Классификация и номенклатура метаморфических горных пород: Справочное пособие** / Под ред. Н.Л. Добрецова, О.А. Богатикова, О.М. Розена. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1992, 205 с.
25. **Bell R.T., and Jackson G.D.** Archean halite and sulphate indications in the Belcher Group, Northwest Territories // *Canad. J. Earth Sci.*, 1974, v. 11, p. 722—728.
26. **Wilkins C.** Regional and contact metamorphism // *Greenstone belts* / Eds. M.J. De Wit and L.D. Ashwal. Oxford, Clarendon Press, 1997, p. 126—163.
27. **Schmid R., Fettes D., Harte B. et al.** A systematic nomenclature for metamorphic rocks. 1. How to name a metamorphic rock: Recommendations by the IUGS Subcommittee on the systematics of metamorphic rocks, 2004. SCMR website (www.bgs.ac.uk/SCMR).
28. **Pettijohn F.J.** Sedimentary rocks. 3rd edition, New York, Harper, 1975, 750 p.
29. **Pettijohn F.J.** Sedimentary rocks. New York, Harper, 1957, 526 p.
30. **Rollinson H.R.** Using geochemical data: evaluation, presentation, and interpretation. Singapore, Longman Scientific & Technical., 1994, 352 p.

*Рекомендована к печати 9 августа 2004 г.
В.С. Шацким*

*Поступила в редакцию
25 мая 2004 г.*