

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ,  
МЕТОДИКА ИХ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 553.048(26)

В.В. АВДОНИН, Н.Е. СЕРГЕЕВА, Ф. ФАРДУСТ

СТРОЕНИЕ ЖЕЛЕЗОМАНГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ И ИХ ОСОБЕННОСТИ  
ФОРМИРОВАНИЯ

В слоистом разрезе рудных оболочек железоманганцевых конкреций (ЖМК) провинции Кларион-Клиппертон выделены и детально изучены слои различных уровней. Макрослои (мощностью 0,5—1,5 см) являются продуктами крупных этапов относительно непрерывного роста конкреций, связанных с импульсами вулканической активности. Строение мезослоев (1—3 мм) отражает фациальную обстановку их формирования. Ритмичное чередование субмикроскопических слойков (0,1—2 мкм), состав которых по данным микроанализа характеризуется контрастным распределением Mn и Fe, управляется механизмом осаждения вещества.

Железоманганцевые конкреции абиссальных котловин (ЖМК) представляют собой агрегаты концентрического строения, сложенные последовательно осажденными слоями. В последовательности, составе, взаимоотношениях слоев и их групп запечатлена история формирования конкреций, механизмы этого процесса и обстоятельства, сопутствующие ему. Очевидно, что для расшифровки всей совокупности процессов образования конкреций необходимо тщательное изучение слоистого «разреза» рудных оболочек, иными словами, необходимо использование применительно к этим миниатюрным объектам приемов и принципов важнейшего метода геологии — анализа геологических разрезов. Специфика подобных исследований состоит в том, что объекты изучения — слои, в данном случае нередко имеющие субмикроскопическую размерность.

В качестве основного материала для изучения были использованы наиболее типичные образцы ЖМК из эталонной коллекции<sup>1</sup>. Все изученные конкреции относятся к генотипу С. По данным [3], именно эта разновидность составляет основу рудных залежей провинции Кларион-Клиппертон в Тихом океане. Конкреции данного типа отличаются от генотипа А и переходного В наиболее высокими средними содержаниями: Mn 30,63, Ni 1,45, Cu 1,14%; среднее содержание Со 0,22%. Конкреции характеризуются уплощенной дискоидальной формой, размер их от 5 до 10 см и более.

Ядра обычно представлены обломками более древних конкреций.

В строении оболочки конкреций выделены слои трех уровней [1]. 1. Макрослои, мощностью от 0,5 до 1,5 см, обычно полностью облекающие конкрецию и разделенные между собой перерывами, несогласиями, следами процессов деструкции. 2. Мезослои или микрослои, чередующиеся в разрезе макрослоев, разделенные резкими границами, иногда несогласиями; толщина их в среднем от 1 до 3 мм. 3. Субмикроскопические слойки, чередование которых определяет текстурный рисунок мезослоев; толщина их от нескольких долей микрон до 1—2 мкм.

В этой иерархии слоев каждый уровень несет определенный блок генетической информации.

Макрослои, обычно хорошо различимые на срезе конкреций невооруженным глазом, соответствуют наиболее крупным этапам роста. При этом в большинстве случаев ранние макрослои, обрастающие ядра, характеризуются меньшими мощностями, чем последующие. Некоторые макрослои представлены совокупностью хорошо выраженных, обособленных мезослоев, в чередовании которых не отмечается какой-либо направленной изменчивости. В других слоях проявляются элементы ритмичного строения.

Макрослои заметно различаются текстурно-структурными особенностями, общим стилем строения и, конечно, составом. Как было отмечено

<sup>1</sup> Эталонные образцы получены от ведущего специалиста НПО «Южморгеология» В.В. Крулякова.

но, нередко эти слои разделены несогласиями, на границах выявлены признаки растворения или разрушения нижнего слоя. Даже в случае согласного залегания макрослои разделяются резкими границами, обусловленными сменой режима осаждения и состава отлагающегося вещества. К границам макрослоев часто бывают приурочены скопления фаунистических остатков, иногда это выражается присутствием своеобразных микрослоев, сложенных фаунистическим детритом. К таким границам тяготеют и скопления новообразований и обломков различных минералов. Здесь наблюдаются, в частности, глинистые образования, а также фосфаты. Подобные взаимоотношения макрослоев интерпретируются практически всеми исследователями как безоговорочное доказательство прерывистости формирования конкреций.

Средний состав макрослоев, имеются в виду прежде всего количественные соотношения марганца и железа, а также содержание кремнезема, кальция, фосфора и других компонентов различается иногда значительно. В ряде случаев фиксируется направленная изменчивость, например, общее возрастание железистости от центра конкреции к периферии, или наоборот.

Содержание рудных элементов-примесей (Ni, Cu, Zn, Pb, Ag, Co, Ba) в макрослоях и обломках древних конкреций в ядрах изучено в пяти образцах с применением лазерного микроанализатора LMA-10. Микроанализы выполнялись в несколь-

ких точках каждого слоя, различающихся текстурно-структурными особенностями, а затем рассчитывались средние показатели.

По результатам лазерного микроанализа различных макрослоев конкреций установлено, что содержания рудных элементов-примесей устойчиво и закономерно возрастают в направлении от ядра конкреции к внешним слоям (рис. 1). Интересно при этом отметить, что во всех пяти конкрециях совпадает не только общий характер изменчивости, но и уровень концентрации большинства компонентов (рис. 2). Это и не удивительно, поскольку все образцы представляют один из районов провинции Кларион-Клиппертон.

Мезослои обладают определенными чертами сходства с макрослоями. Они бывают относительно однородными по текстурному рисунку и составу. Чаше, однако, в них наблюдаются элементы направленной изменчивости. Она выражается в том, что в основании мезослоя обычно находятся полосы параллельно- и волнисто-слоистого строения, согласно и постепенно сменяющиеся развитием дендритовых структур, характеризующихся наличием крупных пор и пустот между столбиками дендритов. При этом в среднем составе нижней части мезослоя преобладает марганец. Завершается мезослой полосой волнисто-слоистого строения, преимущественно железистого состава. Чередование мезослоев с подобной направленной изменчивостью обуславливает ритмичное строение разреза многих участков конкреции (рис. 3).

Марганцовистость и железистость мезослоев изменяется в широких пределах. Например, содержание MnO в нижней, марганцевистой, части мезослоя П на рис. 3 62,18%, а FeO 1,69%. В верхней железистой части количество MnO 43,94%, а FeO 22,0%. В мезослое III содержание MnO в нижней,

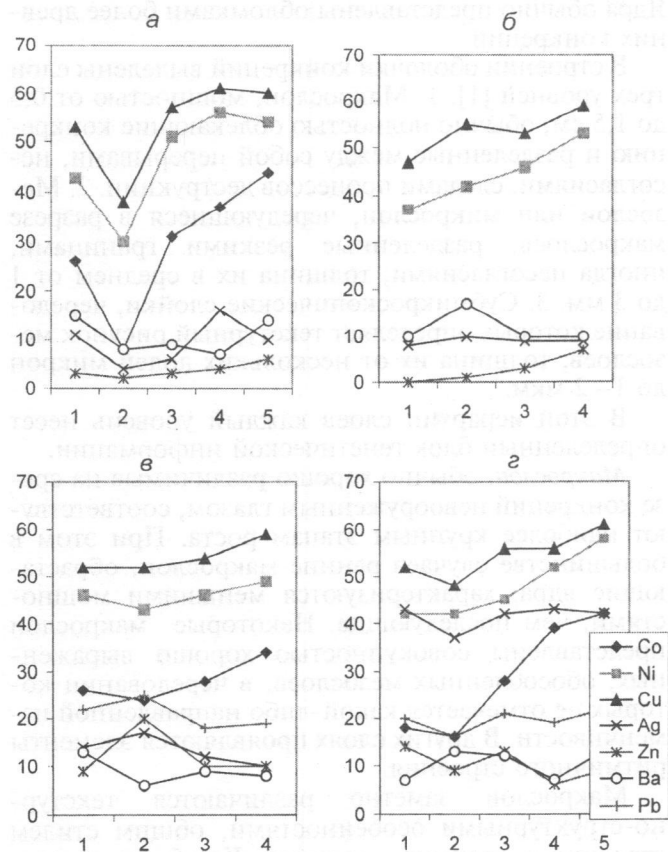


Рис. 1. Содержания рудных элементов-примесей (в относительных единицах) в макрослоях (1-5) конкреций от центра к краю: а - 213; б - 189; в - 182; г - 176

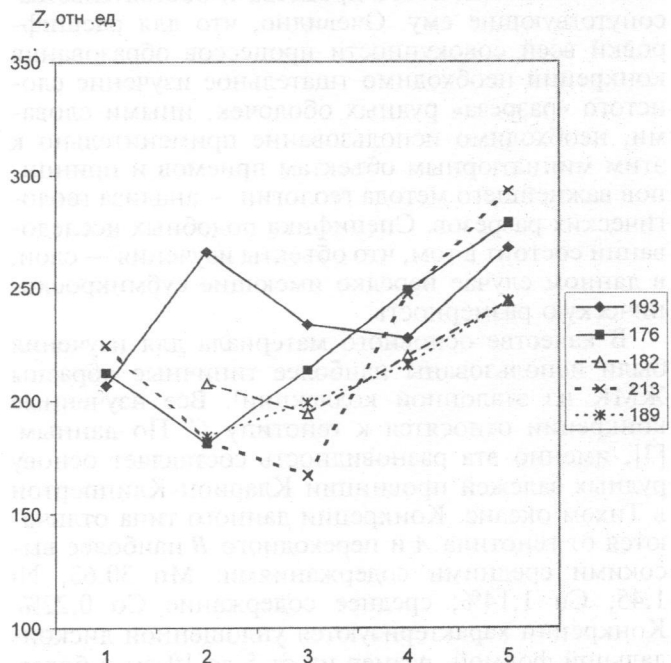


Рис. 2. Распределение суммарного содержания (в относительных единицах) элементов-примесей (Co, Ni, Cu, Ti, Al) в макрослоях конкреций: 1 - ядро; 2 - 5 - макрослои конкреций

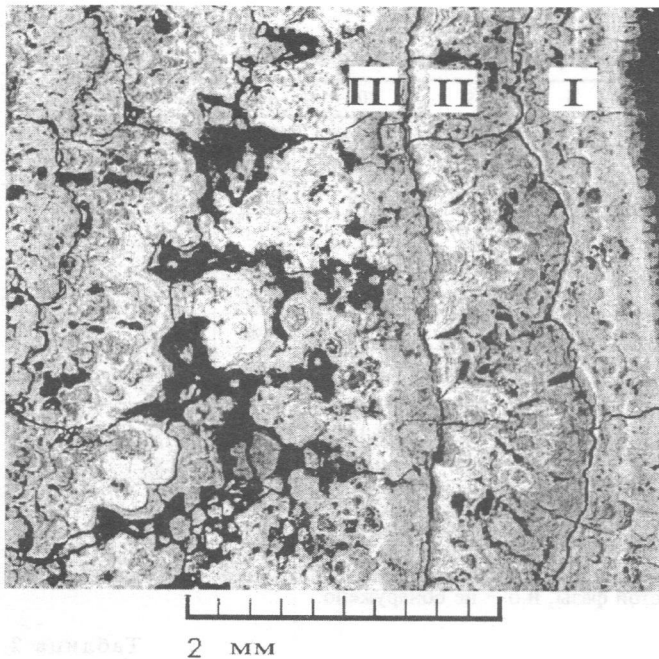


Рис. 3. Фрагмент микрофотографии краевой зоны конкреции 213 (CamScan MV 2300): I, II, III – мезослой

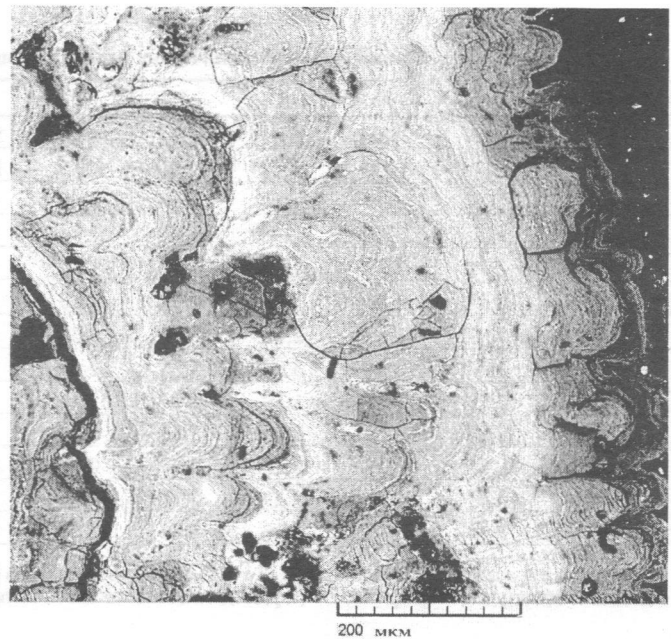


Рис. 4. Строение внешнего мезослоя конкреции (см. мезослой I рис. 3, CamScan MV 2300)

более светлой, части 67,05%, FeO 2,52%. В верхней части концентрация MnO 46,38%, FeO 15,45%. В общем случае в марганцовистых слоях содержание MnO колеблется от 50 до 70% и более, количество FeO — от 2,5 до 1,7% и менее. В железистых слоях содержание MnO 47–40% и менее, FeO 15–25% и более.

Субмикроскопические слои представляют на данном уровне изученности относительно элементарными образованиями. Чередование именно этих элементов обуславливает текстурный рисунок мезослоев: и параллельно-слоистые участки, и дендриты сложены субмикроскопическими слоями.

Сочетания субмикроскопических элементарных слоев в структуре образований более крупных иерархических уровней подразделяются на два типа. Первый тип свойственен практически всем участкам дендритового строения и реже наблюдается в других текстурах. Он характеризуется чередованием субмикроскопических слоев различных (как правило, контрастного) составов, благодаря чему они контрастно выделяются на экранах микроанализаторов и соответствующих фотографиях. Такие микрослои хорошо индивидуализированы, имеют четкие границы, характеризуются относительно большой протяженностью и выдержанностью. Даже в тех случаях, когда в разрезах преобладают слои одного или близкого состава, они разделяются четкими, резкими границами.

Второй тип чаще наблюдается в участках волнисто-слоистого сложения. Здесь, как правило, индивидуальные слои выделяются на фоне относительно однородных масс. Сами слои имеют прерывистое, линзовидное строение, малую протяженность. Представляющая однородной масса, в которой расположены подчеркивающие текстур-

ный рисунок субмикроскопические слои, также слоистая, но сложена слоями одинакового или очень близкого состава (рис. 4).

Главнейшая особенность субмикроскопических слоев — контрастность состава. Это отчетливо проявляется даже в участках второго типа переслаивания. В целом самый внешний мезослой конкреции 213 имеет железистый состав (среднее содержание MnO 45,33%, FeO 22,0%). В строении мезослоя на фоне общей темной (железистой) массы выделяются более редкие относительно светлые слои — невыдержанные, четковидные, прерывистые. По данным микроанализа (табл. 1) все слои отчетливо разделяются на две группы: марганцовистые (среднее содержание MnO 51,66, FeO 16,53%) и железистые (среднее содержание MnO 34,77, FeO 30,24%). При этом железистые слои в отличие от марганцовистых заметно фосфатизированы, обогащены кремнеземом и титаном, а также хлором, обеднены магнием и хромом (табл. 1).

Аналогичная картина наблюдается и в базальном участке этого слоя, где характеристики контрастных слоев очень близки к рассмотренным (табл. 2). Выявленные особенности распределения компонентов между двумя фазами достаточно устойчиво проявляются во всех подобных структурах оксидных океанских руд. Обогащение магнием марганцовистой фазы определяется тем, что преобладающий в этой фазе вернадит тесно ассоциирует со шпинелидами, образуя с ними субмикроскопические сращения. Их присутствием объясняется увеличение содержания хрома в марганцовистых фазах. Связь фосфатов с железистыми фазами ранее установлена при изучении кобальтоносных корок [2]; наблюдаемое в конкрециях обогащение железистых фаз фосфором подтверждает, по наше-



Таблица 1

## Состав субмикроскопических слоев по данным микрорентгеноспектрального анализа

Компонент	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	A	B
MnO	31,27	29,68	35,47	42,67	45,84	52,84	46,53	48,92	55,81	60,01	51,66	34,77
FeO	33,30	33,53	28,52	25,60	15,24	15,20	15,93	18,45	17,05	17,32	16,53	30,24
NiO	н.о	н.о	н.о	н.о	2,06	2,16	1,81	1,26	1,28	1,74	1,72	—
SiO <sub>2</sub>	14,53	17,61	13,39	11,43	7,84	8,58	9,79	7,27	7,24	5,13	7,64	14,24
TiO <sub>2</sub>	2,14	2,20	2,10	2,40	1,53	1,71	1,78	1,92	1,89	1,44	1,71	2,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,33	3,36	3,25	2,63	3,30	3,71	3,53	2,64	2,33	1,26	2,79	2,89
MgO	1,87	1,87	2,35	2,97	4,35	4,39	3,17	2,90	2,98	3,39	3,53	2,26
CaO	3,44	3,34	3,05	3,25	2,65	2,61	3,03	3,33	2,69	2,63	2,82	3,27
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,76	1,56	1,19	1,14	н.о	н.о	1,00	н.о	н.о	н.о	0,16	1,41
Na <sub>2</sub> O	2,88	3,50	3,26	3,83	1,83	2,66	2,44	2,71	3,14	3,72	2,75	3,37
K <sub>2</sub> O	0,41	0,58	0,77	0,73	0,79	0,83	0,80	0,86	0,96	0,88	0,85	0,62
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,61	1,14	2,49	2,11	12,77	4,49	9,35	8,77	3,88	1,62	6,81	2,59
Cl	1,46	1,65	1,26	1,24	0,86	0,82	0,83	0,96	0,78	0,85	0,85	1,40

Примечание. Микроанализы (2 – 11) слоев внешнего слоя конкреции 213, CamScan MV 2300, мас.%, A – средний состав слоев марганцевистой фазы, B – средний состав слоев железистой фазы, н.о – не обнаружено.

Таблица 2

## Состав субмикроскопических слоев по данным микрорентгеноспектрального анализа

Компонент	21	22	23	24	25	26	27	A	B
MnO	55,93	40,82	46,96	43,08	48,80	53,17	55,60	54,9	44,91
FeO	14,60	29,22	23,42	28,38	22,94	18,91	16,64	16,72	25,97
NiO	2,75	н.о	1,89	н.о	1,14	1,32	1,79	1,95	0,76
SiO <sub>2</sub>	7,87	11,68	7,95	9,55	8,37	6,32	5,47	6,55	9,39
TiO <sub>2</sub>	1,36	2,25	1,95	2,20	2,28	1,75	1,71	1,61	2,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,71	1,47	1,54	1,60	1,71	1,70	1,77	1,73	1,58
MgO	4,82	2,27	2,61	1,50	2,04	2,93	3,69	3,81	2,10
CaO	2,76	3,84	3,60	3,90	3,55	3,61	3,32	3,23	3,72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	н.о	1,11	0,85	1,10	0,99	1,08	1,00	0,69	1,01
Na <sub>2</sub> O	4,25	3,74	5,48	4,81	5,44	5,45	5,73	5,14	4,87
K <sub>2</sub> O	0,47	0,37	0,57	0,53	0,58	0,54	0,49	0,50	0,51
Cl	1,41	2,18	2,21	2,16	2,16	2,11	1,87	1,80	2,18

Примечание. Анализы (21 – 27) слоев базальной части I слоя конкреции 213, CamScan MV 2300, мас.%, A – средний состав слоев марганцевистой фазы, B – средний состав слоев железистой фазы, н.о – не обнаружено.

Таблица 3

## Состав субмикроскопических слоев по данным микрорентгеноспектрального анализа

Компонент	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	A	B
MnO	53,68	53,78	65,80	55,67	50,67	48,84	70,31	74,87	48,92	69,46	63,54	56,50	68,21	65,87	79,20	69,66	52,58
FeO	14,26	19,23	3,28	15,06	21,01	21,76	2,65	1,95	21,26	1,27	4,29	14,53	1,52	9,02	н.о	3,0	18,16
NiO	0,87	н.о	4,30	1,08	н.о	н.о	4,77	4,41	н.о	4,86	5,57	1,23	5,03	1,46	3,02	4,18	0,45
SiO <sub>2</sub>	9,36	7,05	1,57	7,17	7,84	8,03	1,11	н.о	7,69	4,23	3,71	8,08	4,37	3,89	0,89	2,47	7,89
TiO <sub>2</sub>	1,91	2,56	0,67	2,13	2,34	2,40	0,67	н.о	2,52	н.о	н.о	1,76	н.о	2,23	н.о	0,45	2,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,86	1,56	5,06	2,80	1,94	1,73	2,66	1,43	1,48	3,52	5,04	2,36	3,80	1,94	0,92	3,05	2,10
MgO	3,73	2,83	7,68	3,43	2,46	2,34	6,08	4,98	2,27	5,18	7,07	3,81	5,96	3,86	3,54	5,54	2,98
CaO	3,31	4,25	2,09	3,34	3,96	4,34	2,09	2,36	4,49	2,33	1,87	3,59	2,13	3,51	2,64	2,38	3,90
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	н.о	н.о	н.о	н.о	0,94	0,94	н.о	н.о	0,98	н.о	н.о	н.о	н.о	0,80	н.о	0,10	0,41
Na <sub>2</sub> O	4,44	4,70	4,30	4,52	4,34	5,12	4,25	4,68	5,16	3,50	4,29	3,73	4,04	3,66	4,09	4,10	4,57
K <sub>2</sub> O	1,19	1,00	0,96	1,28	1,01	0,91	1,46	1,53	0,93	1,69	1,02	1,19	1,20	1,06	1,32	1,28	1,07
CuO	1,29	н.о	3,56	1,24	н.о	н.о	3,46	3,16	н.о	3,51	3,11	1,65	3,35	1,32	3,81	3,16	0,60
Cl	1,98	2,09	0,75	1,49	2,53	2,36	0,49	0,65	2,87	0,45	0,51	1,57	0,40	1,38	0,54	0,65	2,13

Примечание. Микроанализы (48 – 62) слоев обломка древней конкреции в ядре обр. 213, CamScan MV 2300, мас.%, A – средний состав слоев марганцевистой фазы, B – средний состав слоев железистой фазы, н.о – не обнаружено.

му мнению, вывод об осадочной (а не метасоматической) природе фосфатов в оксидных рудах.

При рассмотрении особенностей состава микрослойков и сравнении их между собой нужно иметь в виду, что микроанализ не позволяет получить точные значения состава каждого данного микрослойка, поскольку площадь замера всегда больше толщины слойка, поэтому практически всегда при анализе захватывается материал соседних слойков. В связи с этим можно предположить, что истинная контрастность их существеннее.

Для выяснения природы контрастности интересно рассмотреть состав субмикроскопических слойков в марганцовистых частях разрезов. Чередование контрастных микрослойков наблюдалось, в частности, в обломке древней конкреции (обр. 213), участок которой характеризуется в общем более марганцовистым составом. Как видно по результатам микроанализа (табл. 3), здесь также отчетливо выделяются две группы слойков. Марганцовистой свойственны содержания: MnO 69,66%, FeO 3,0%; железистой — MnO 52,58%, FeO 18,16%. Качественное различие этих фаз во всех деталях подобно отмеченному для железистых участков. В частности, фаза, обогащенная железом, содержит больше кремнезема, именно в железистых слойках отмечается фосфор, хотя и в меньших концентрациях, чем в приведенном выше примере. Характерно, что и все остальные компоненты: магний, титан, кальций, хлор распределены между фазами совершенно одинаково. Отличие в том, что установлены почти чистые марганцевые фазы, не содержащие железа (в пределах чувствительности микроанализатора). Вероятно, эти фазы представлены мономинеральным вернадитом или другими гидроксидами марганца. Примечательно, что чисто железистые фазы не обнаружены; максимально высокое содержание FeO, зафиксированное в одном из анализов, 36,0%, при этом количество MnO 29,96%, по-видимому, это — марганцовистый ферроксигит.

Что касается распределения рудных компонентов, то здесь наблюдается полное соответствие тому, что установлено на макро- и микроуровне: никель, медь, цинк концентрируются в марганцовистых фазах, кобальт тесно связан с железом.

Сопоставление этих двух примеров показывает, что состав контрастных фаз определяется, скорее всего, средним составом той среды, из которой материал осаждается на поверхность формирующейся конкреции.

Рассмотренные выше особенности строения конкреций позволяют сделать следующие выводы относительно механизмов и истории формирования этих образований.

Как отмечалось в [1], одна из важнейших особенностей строения конкреций — ритмически-слоистое чередование контрастных по составу субмикроскопических слойков обусловлена, вероятно, действием автоколебательного механизма осаждения вещества на поверхность конкреции в процессе ее роста. Установлено, что различие в составе чередующихся субмикроскопических слой-

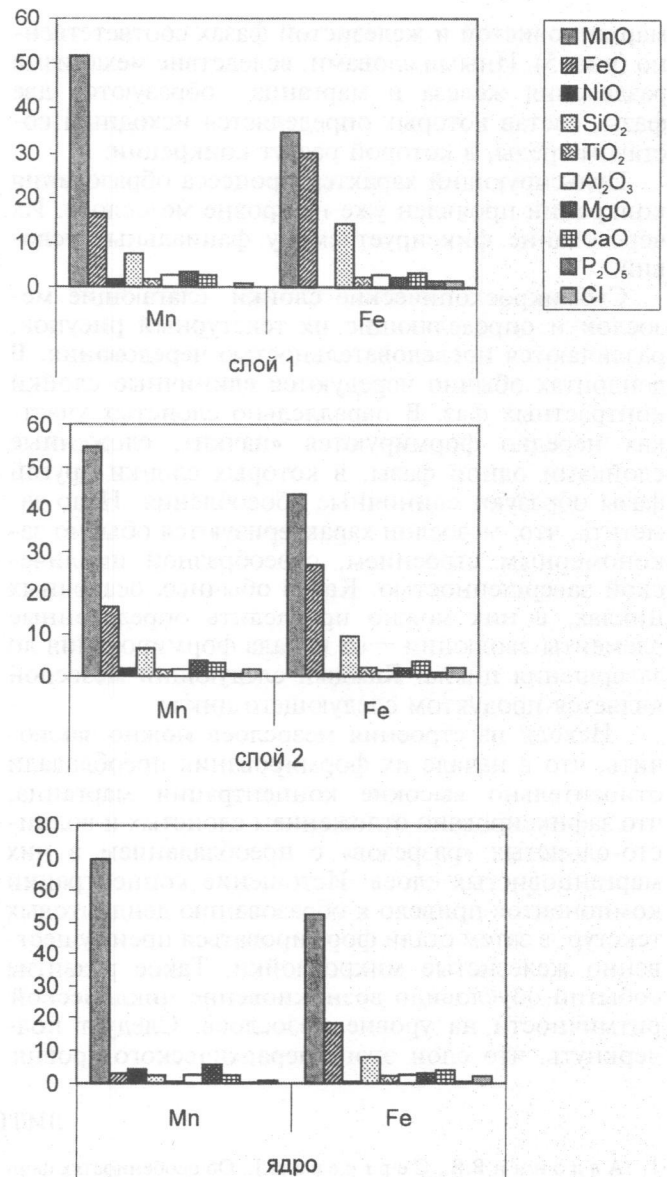


Рис. 5. Сопоставление составов контрастных фаз: марганцовистой (Mn) и железистой (Fe) различных слоев конкреции 213

ков, позволяет отождествлять их с кристаллической и аморфной фазами, впервые выделенными Р. Соремом и Р. Фьюксом [1, 5]. Выполненные работы вносят существенные коррективы в эти представления. Главный вывод заключается в следующем. Ритмичное чередование различных по составу (мы назвали их контрастными) субмикроскопических слойков — фаз рудного вещества свойственно всем слоям конкреций, наблюдается практически во всех типах текстур — слоистых, дендритовых и т. д. В основе их различий — контрастность содержаний железа и марганца, что позволяет одну из фаз называть железистой, другую — марганцовистой. Однако состав этих пар фаз, как видно из приведенных данных, может заметно различаться: в одних случаях содержание MnO в марганцовистой фазе составляет 52%, в железистой — 35%, FeO соответственно 18 и 32%; в других — концентрация марганца в сопряженной паре возрастает до 70 и 52%, а железа падает до 3 и 18% в

марганцовистой и железистой фазах соответственно (рис. 5). Иными словами, вследствие механизма разделения железа и марганца образуются две фазы, состав которых определяется исходным составом среды, в которой растут конкреции.

Пульсирующий характер процесса образования конкреций проявлен уже на уровне мезослоев. Их чередование фиксирует смену фациальных условий.

Субмикроскопические слои, слагающие мезослои и определяющие их текстурный рисунок, различаются последовательностью чередования. В дендритах обычно чередуются единичные слои контрастных фаз. В параллельно-слоистых участках нередко формируются «пачки», сложенные слоями одной фазы, в которых слои другой фазы образуют единичные обособления. Надо заметить, что мезослои характеризуются обычно закономерным строением, своеобразной циклической завершенностью. Как в обычных осадочных циклах, в них можно проследить определенные элементы эволюции — от начала формирования до завершения цикла. Каждый следующий мезослой является продуктом следующего цикла.

Исходя из строения мезослоев можно заключить, что в начале их формирования преобладали относительно высокие концентрации марганца, что зафиксировано отложением слоистых и волнисто-слоистых «разрезов» с преобладанием в них марганцовистых слоев. Истощение концентраций компонентов привело к образованию дендритовых текстур, а затем стали формироваться преимущественно железистые микрослойки. Такое развитие событий обусловило возникновение циклической ритмичности на уровне мезослоев. Следует подчеркнуть, что слои этого иерархического уровня

не разделяются длительными перерывами, обычно на фоне ритмической повторяемости сходных слоев наблюдаются признаки эволюционной изменчивости в составе и строении макрослоя.

Макрослои традиционно рассматриваются как производные крупных этапов формирования конкреций, разделенных перерывами, иногда очень длительными. Нередко такие перерывы заканчивались разрушением конкреций и при возобновлении импульса конкрециеобразования новые слои нарастали на обломки разрушенных конкреций, которые становились, таким образом, ядрами этих новых образований. Подобные явления повторялись неоднократно. Указанные свойства макрослоев делают их потенциальными элементами стратификации, в какой-то степени подобными основным слоям корковых образований гайотов, по которым приведена достаточно убедительная стратификация [4].

Таким образом, чередование отличающихся по составу слоев в рудной оболочке конкреций различается по генезису. Переслаивание контрастных субмикроскопических слоев обусловлено действием автоколебательного механизма осаждения. Особенности состава и строения мезослоев определяются фациальной обстановкой их формирования, в первую очередь, изменением концентраций рудных компонентов в активном слое в процессе нарастания данного мезослоя. Каждый из макрослоев фиксирует определенный крупный этап относительно непрерывного роста конкреций, связанный, вероятно, с соответствующим импульсом вулканической активности, а чередование макрослоев отражает смену этапов активизации и затухания вулканизма вблизи областей локализации конкреций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин В.В., Сергеева Н.Е. Об особенностях формирования железомарганцевых конкреций и корок // Вестн. МГУ. Серия 4. Геология. 2003. № 5. С. 31–39.
2. Авдонин В.В., Сергеева Н.Е. Фосфатизация железомарганцевых корок гайотов Магеллановых гор (Тихий океан) // Бюл. МОИП. Отд. геологии. 2004. Т.79. В. 6. С. 39–45.
3. Кругляков В.В., Пономарева И.Н. Проблемы освоения железомарганцевых конкреций // Вестн. МГУ. Серия 4. Геология. 2001. № 1. С. 65–69.
4. Мельников М.Е., Пуляева И.А. Железомарганцевые корки поднятия Маркус-Уэйк и Магеллановых гор Тихого океана: строение, состав, возраст // Тихоокеанская геология. 1994. № 4. С. 13–27.
5. Sorum R.K., Fewkes R.H. Manganese Nodules: Research Data and Methods of Investigation. Washington, W. IFI, 1979. 722 p.

Московский государственный университет  
Рецензент — В.Е. Бойцов.