

PACSnumbers: 62.23.Pq, 68.37.Hk, 81.07.Bc, 81.70.Pg, 82.70.Dd, 83.60.-a, 83.80.Hj, 87.85.Rs

Наноструктуры в процессах нанохимических и микробиологических трансформаций и разделения железооксидносиликатных рудных материалов (ЖСРМ)

А. В. Панько¹, И. Г. Ковзун¹, В. А. Прокопенко^{1,2}, Е. А. Цыганович¹,
В. А. Олейник¹, Е. В. Аблец¹, Е. М. Никипелова³

¹*Институт биокolloидной химии им. Ф. Д. Овчаренко НАН Украины,
бульв. Академика Вернадского, 42,
03142 Киев, Украина*

²*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
просп. Победы, 37, корп. 4,
03056 Киев, Украина*

³*ГУ «Украинский научно-исследовательский институт медицинской
реабилитации и курортологии МОЗ Украины»,
пер. Лермонтовский, 6,
65014 Одесса, Украина*

С использованием физико-химических и микробиологических методов, а также методов физико-химической геомеханики изучено влияние наноструктур на процессы нанохимических и микробиологических трансформаций железооксидносиликатных рудных материалов (ЖСРМ) и показана их взаимосвязь с последующими процессами разделения, обогащения и очистки таких материалов. Отмечено лимитирующие влияние наноструктур на все стадии последовательно протекающих процессов природных и техногенных трансформаций ЖСРМ. На основании полученных результатов дано научное обоснование разработанных методов переработки и очистки ЖСРМ от примесей алюмосиликатов и мышьяка, фосфора и серы, а также даны рекомендации по их усовершенствованию. Практическая реализация разработанных экологически безопасных безотходных методов позволила получить из бедных ЖСРМ высокообогащенные магнетитовые и металлизированные концентраты, очищенные на 90–95% от примесей.

З використанням фізико-хімічних і мікробіологічних метод та метод фізико-хімічної геомеханіки вивчено вплив наноструктур на процеси нанохімічних і мікробіологічних трансформацій залізооксидносілікатних рудних матеріалів (ЗСРМ) та показано їх взаємозв'язок із наступними процесами розділення, збагачення й очищення таких матеріалів.

Відзначено обмежувальний вплив наноструктур на всі стадії процесів природних і техногенних трансформацій ЗСРМ, які послідовно перебігають. На основі одержаних результатів дано наукове обґрунтування розроблених метод перероблення й очищення ЗСРМ від домішок алюмосилікатів та Арсену, Фосфору та Сульфуру, а також дано рекомендації стосовно їх вдосконалення. Практична реалізація розроблених екологічно безпечних безвідходних метод уможливила одержати з бідних ЗСРМ високозбагачені магнетитові та металізовані концентрати, очищені на 90–95% від домішок.

The impact of nanostructures on the nanochemical and microbiological iron-oxide-silicate ore materials (IOSOM) transformation processes is studied using physicochemical, microbiological and physicochemical geomechanical methods, and their correlation with subsequent processes of separation, purification and enrichment of these materials is shown. Nanostructure limiting impact on all stages of sequential processes of the natural and technogeneous IOSOM transformations is noted. Based on obtained results, a scientific substantiation of the developed methods of IOSOM processing and purification from aluminosilicates, arsenic, phosphorus and sulphur impurities is given, and recommendations for their improvement are given too. Practical implementation of environmentally safe and waste-free developed methods allows fabrication of highly enriched (up to 90–95%) magnetite and metallic concentrates from the poor IOSOM.

Ключевые слова: железооксидносиликатные материалы, физико-химическая геомеханика, биокolloидные взаимодействия, очистка от мышьяка и фосфора.

Ключові слова: залізооксидносілікатні матеріали, фізико-хімічна геомеханіка, біокolloїдні взаємодії, очищення від Арсену та Фосфору.

Key words: iron-oxide-silicate ore materials, physicochemical geomechanics, biocolloidal interactions, purification from arsenic and phosphorus impurities.

(Получено 1 декабря 2016 г.; после доработки — 9 декабря 2016 г.)

1. ВСТУПЛЕНИЕ

Среди природных дисперсных горных пород, особое место занимают широко распространённые и активно используемые в различных целях железооксидносиликатные рудные материалы (ЖСРМ). Их механические, коллоидно-химические, нанохимические, микробиологические и в отдельных случаях термические трансформации в земной коре приводят к образованию наноструктурированных полиминеральных материалов, содержащих в основном оксиды железа, кремния, алюминия, а также другие неорганические и

органические компоненты. К таким материалам, наиболее широко используемым в практических целях, относятся железисто-силикатные руды с содержанием железа, в пересчёте на металлическое, 30–40%, как правило, с гётито-сапонитовой минерализацией, железосодержащие глины, пелитовые осадки, а также железистые кварциты [1–13]. Поскольку практическое значение ЖСРМ постоянно возрастает, то это привлекает внимание исследователей к протекающим в них процессам и детальному изучению их механизмов [1–8, 12, 13]. Однако пока недостаточно развиты представления о роли физико-химической механики [14] и микробиологических закономерностей [6, 7] в процессах нанохимического, механохимического и структурного преобразования ЖСРМ. Недостаточно обсуждались проблемы трансформации и метаморфизма ЖСРМ с последующим формированием нанодисперсных структур, их высокотемпературного преобразования, разделения, обогащения, очистки и практического использования полученных продуктов. Требуют уточнения механизмы участия примесей силикатов, соединений фосфора, мышьяка и др. в нанохимических преобразованиях ЖСРМ. Поэтому является актуальным исследование взаимосвязи метаморфизма и трансформации ЖСРМ с их геомеханическими, химическими, микробиологическими и нанохимическими преобразованиями, а также с процессами восстановления при высоких температурах и очистки от примесей алюмосиликатов, мышьяка и фосфора, что и послужило основанием для постановки настоящей работы.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электронно-микроскопические снимки образцов ЖСРМ получали на электронном микроскопе фирмы «Селми» в режиме светового поля, морфологию образцов исследовали на растровом электронном микроскопе JSM6490LV фирмы JEOL (Япония) и атомно-силовом микроскопе 'Solver PRO'. Термограммы образцов получали на дериватографической установке (Венгрия). Рентгенограммы снимали на приборе ДРОН-УМ1 с двумя щелями Соллера с фильтрованным CuK_α -излучением. Реологические исследования осуществляли на приборе 'Rheotest 2' (Германия), соединённом с ПК для записи данных. Химический состав образцов определяли рентгенофлуоресцентным методом. Физико-геомеханические и нанохимические процессы трансформации ЖСРМ в природных и техногенных условиях моделировали, используя методы физико-химической геомеханики [6, 14], а их восстановление до магнетита или металлизированного продукта — в условиях, описанных в [3, 11]. Микробиологическое тестирование суспензий ЖСРМ проводили в соответствии с методиками [12]. В качестве

основного образца для исследований использовали дисперсный гётито-сапонитовый железооксидносиликатный рудный материал (Приазовье) осадочного биокolloидного происхождения, содержащий (масс.%) 32,88 Fe, 4,78 Mn, 1,13 CaO, 1,88 Al₂O₃, 11,11 SiO₂, 1,38 P, 0,12 As и 0,09 S, а также другие железосодержащие материалы [2, 4, 6].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные реограммы типичного ЖСРМ (рис. 1) свидетельствуют о том, что кривые течения его водных суспензий характеризуются нестандартной гипераномалией вязкости, которая объясняется присутствием в зонах контакта аморфных железооксидносиликатных нанокластерных фаз, образующихся в результате механохимических и нанохимических процессов [1, 3]. Послед-

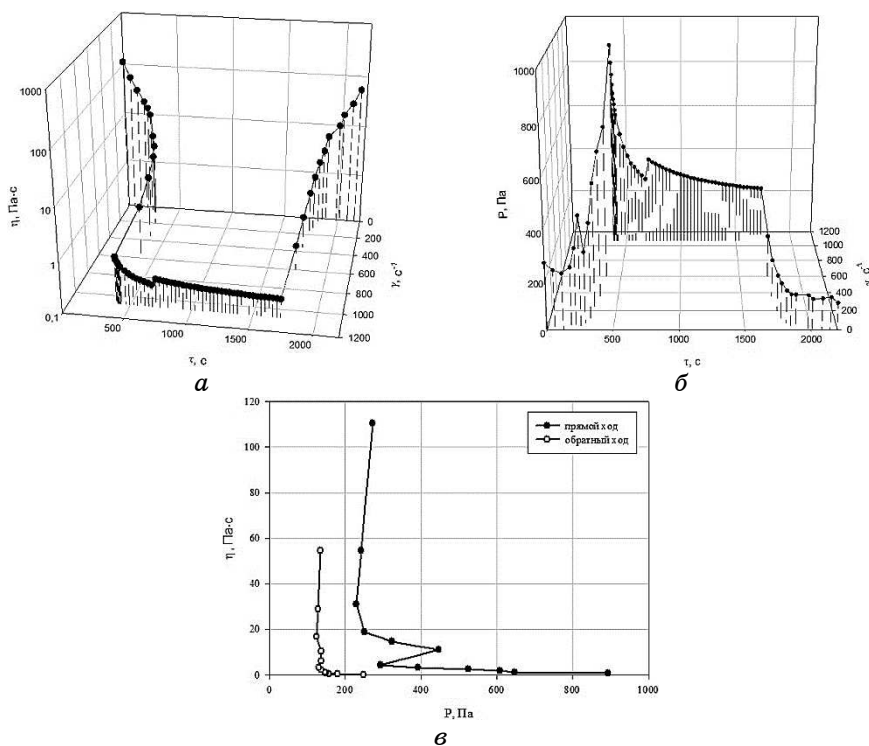
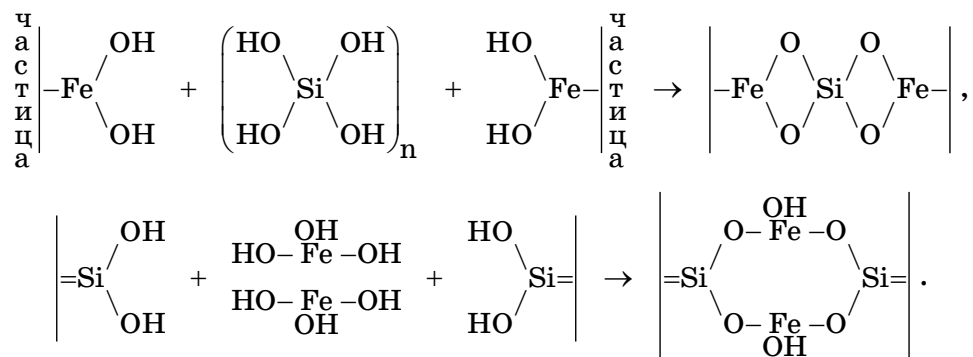


Рис. 1. Реограммы ЖСРМ (а, б). Зависимость вязкости (η) от напряжения сдвига (P) осадочного ЖСРМ (в). Влажность суспензии — 45%. (●) — «прямой» и (○) — «обратный» ход кривых.¹

ние сопровождаются преобразованием слабых коагуляционных контактов в более прочные коагуляционно-конденсационные, что приводит к возрастанию вязкости суспензий [6–8], например, за счёт реакций:



Рентгенограмма образца (рис. 2) также указывает на аморфное высокодисперсное строение ЖСРМ, причиной которого являются нанохимические и микробиологические поверхностные процессы [7]. В состав образца входили гётит, сапонит, кварц, сульфиды, нанодисперсные примеси фосфатов и арсенатов алюминия и железа, имеющих микробиологическое происхождение [6, 7, 12, 13].

Выводы, сделанные при анализе данных рис. 1 и 2, однозначно указывают на сложность и неэффективность водных методов обогащения, разделения и очистки таких аморфно-кристаллических материалов. Поэтому более рационально применение других методов, прежде всего высокотемпературных, которые взаимосвязаны с предшествующими процессами геомеханического диспергирования плотных горных пород [14], последующего сноса дисперсий в водные артерии и условиями осадкообразования, происходящих в озёрах, морях и океанах [6, 9, 10, 12, 15]. По данным [4, 7, 12], эти процессы также существенно зависят от биокolloидных (микробиологических и коллоидных) изменений в суспензиях ЖСРМ. Они связаны с тем, что в результате селективного взаимодействия микроорганизмов с минеральными частицами биогеоценозы формируют основу осадочных железистооксидно-силикатных рудных месторождений [6, 7, 16].

Осадочные ЖСРМ содержат и органические вещества — продукты жизнедеятельности микроорганизмов наряду с живыми организмами. Такие продукты метаболизма участвуют в высокотемпературных восстановительных процессах метаморфизма $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}$, причём начало процесса металлизации — выше 950°C , в земной коре и в трансформациях ЖСРМ в техногенных восстановительных условиях [3–6] наряду с дисперсным углём или газообразными углеводородами (рис. 3 и 4).

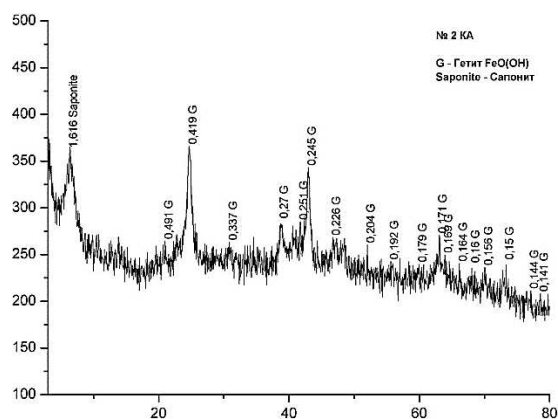


Рис. 2. Рентгенограмма осадочного ЖСРМ: G–Гётит FeO(OH), Saponite–Сапонит.²

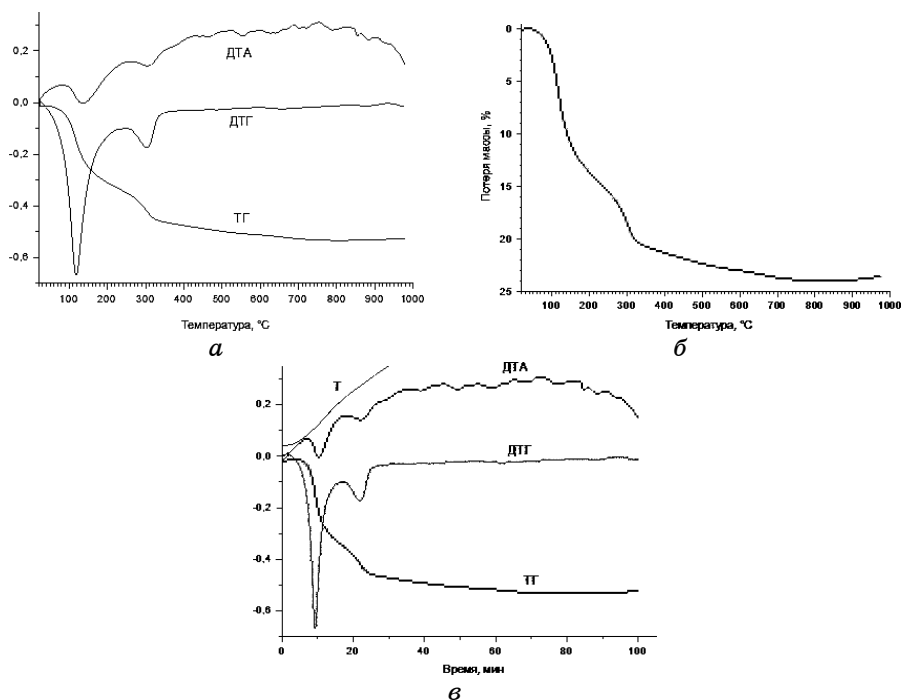


Рис. 3. Термограммы осадочного ЖСРМ.³

Высокотемпературным и микробиологическим воздействиям на пелитовые осадки ЖСРМ предшествуют, также очевидно взаимосвязанные с ними геомеханические и геохимические преобразо-

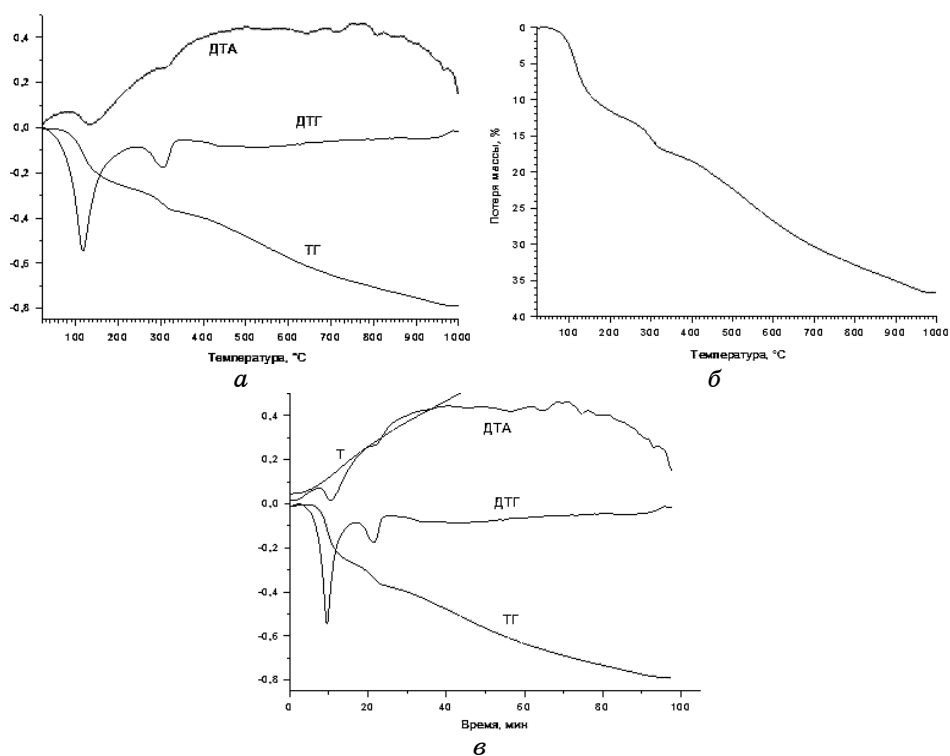
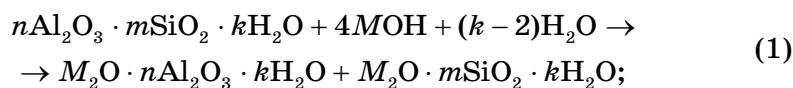


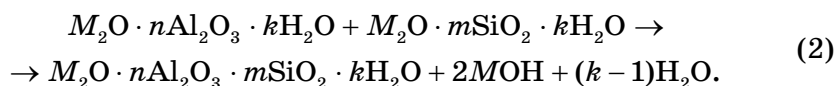
Рис. 4. Термограммы смеси ЖСРМ с углём при соотношении 4:1, характеризующие реакцию образования магнетита $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}$ с началом процесса металлизации выше 950°C .⁴

вания железосодержащих горных пород, которые следует рассмотреть более подробно для установления их роли в последующих процессах.

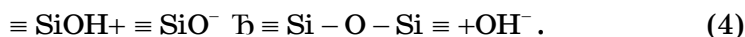
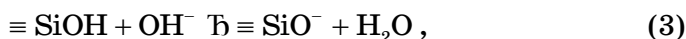
Действительно, формированию пелитовых осадков в длительных природных геологических условиях в слабощелочной дисперсионной среде [8] предшествуют механические и механохимические трансформации горных железосодержащих пород, также сопровождающиеся образованием нано- и микрочастиц и протекающие в соответствии с законами физико-химической геомеханики [6, 14]. При этом в соответствии с [6–8, 14], химические процессы, могут протекать в нанотрещинах с размерами 10–100 нм в соответствии с уравнениями:



продукты реакции (1) далее реагируют по схеме:



Образованный по реакции (2) кристаллогидрат имеет больший объем, чем исходный продукт, который участвует в реакции (1). Поэтому возникающее кристаллизационное давление разрывает (химически расклинивает) трещину, чему симбатно способствуют внешние механические нагрузки. Вода, дополнительно поступающая в расширенную до микрометров первичную нанотрещину, на следующем этапе гидролитически разрушает продукт реакции (2) с высвобождением щелочи, которая диффундирует в виде раствора во вновь созданную вторичную нанотрещину. Процесс протекает, как и в случае проникновения жидких фаз по межзёрненным границам, однако на несколько порядков быстрее и измеряется уже не годами, а часами [8]. Этому также способствуют нанохимические взаимодействия, которые дополняют взаимодействия (1) и (2) и характеризуются реакциями:



Реакции (3) и (4) обусловлены трансформациями в растворимых силикатах дисперсионной среды и влияют на вязкость суспензии ЖСРМ, что следует из полученных для исследуемого образца данных (рис. 5).

Реакция (4) является реакцией полимеризации, и приводит к образованию нерастворимых полисиликатных наноструктур на

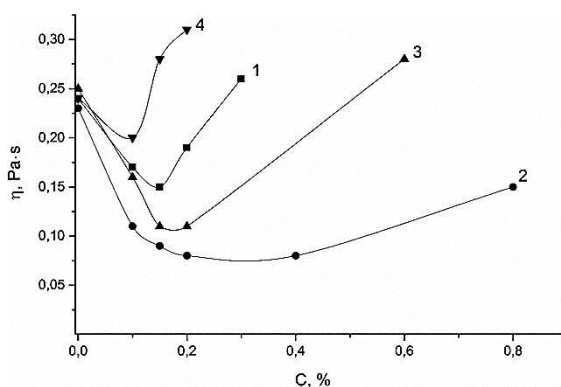


Рис. 5. Влияние химического состава и концентрации силикатных нанокластеров на вязкость суспензий ЖСРМ: 1 — $(Si_3O_7^{2-})_n$; 2 — $(Si_2O_5^{2-})_n$; 3 — $(SiO_3^{2-})_n$; 4 — $(SiO_4^{4-})_n$.⁵

поверхности трещины твёрдой фазы, а высвобожденные гидроксильные ионы участвуют в реакции (1), или в реакции (3). Итак, реакции (3) и (4) являются промежуточными в процессах (1) и (2), а коллоидно-химические взаимодействия, которые протекают на наноуровне на твёрдой поверхности нанотрещин железосодержащей силикатной породы, тесно связаны с химическими превращениями в объеме дисперсионной среды [8].

Результаты, полученные в экспериментальной части работы, позволили, с учётом известных представлений [1–16], предложить обобщённую схему физико-геомеханических, механохимических и биокolloидных процессов метаморфизма и трансформации горных железокислородосиликатных рудных материалов в осадочные ЖСРМ и железокварциты с участием нано- и микродисперсных структур (рис. 6). Микрофотографии структур, образующихся на разных стадиях процессов (рис. 6), представлены на рис. 7 и 8.

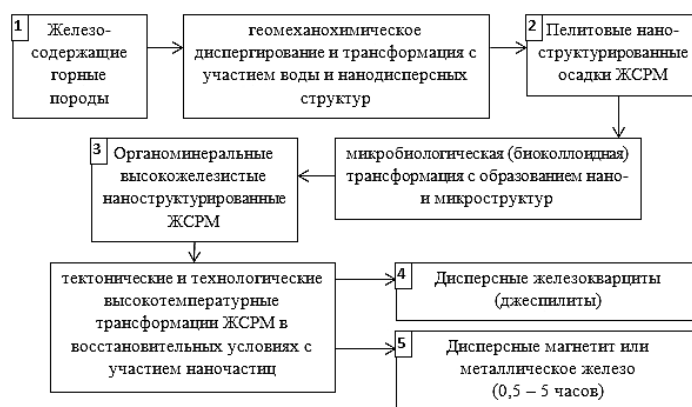


Рис. 6. Схема трансформирования природных и техногенных железосодержащих горных пород в пелитовые осадки, джеспилиты и металлизированные материалы.⁶

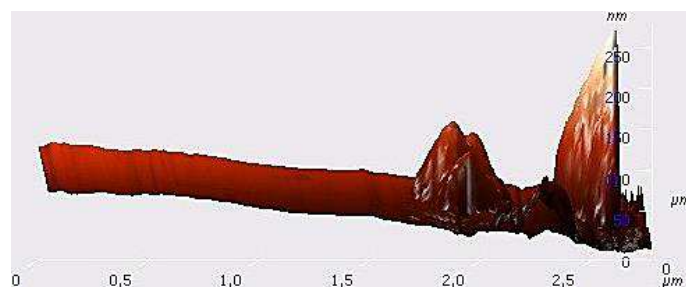


Рис. 7. Атомно-силовое изображение металлизированных магнитных частиц, образовавшихся при 1200°C по схеме рис. 6 (стадия 5).⁷

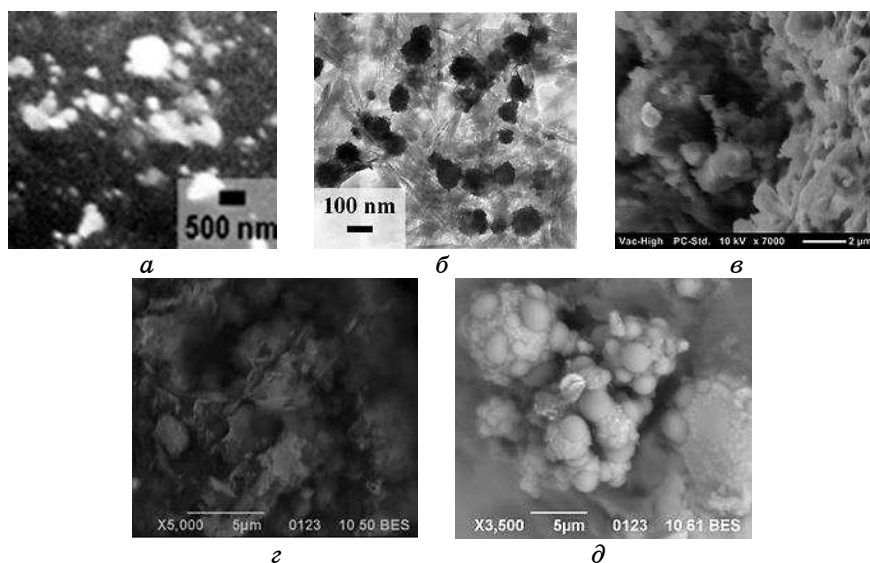


Рис. 8. Микрофотографии структур, образующихся на разных стадиях (1, 2, 3, 4, 5) процессов по схеме рис. 6.⁸

Предложенная на основании аналитико-экспериментальных исследований схема метаморфизма и нанохимической трансформации железосодержащих горных пород с участием наноструктур, микроорганизмов, а также в условиях повышенных температур (рис. 6), с образованием ЖСРМ типа пелитовых осадков и нанокристаллических джеспилитов, позволила дать научное обоснование последующим технологическим процессам высокотемпературной твердофазной металлизации железных руд, разделения и очистки металлизированных продуктов от неметаллических примесей.

Так, согласно [3, 6, 11], можно получить металлизированный продукт путём прямого восстановления железорудного сырья углеродным восстановителем при 900–1300°C, в котором используются, например, окислённые окатыши, содержащие 67,83 масс.% Fe_{общ} (суммарное количество примесей — 3,38%), к которому добавляется флюс для удаления серы, например, известняк, а также восстановитель, например, бурый уголь. Полученный из такой смеси металлизированный продукт содержал (масс.%): 87,63 Fe_{мет}, 2,43 SiO₂, 0,98 Al₂O₃, 0,42 CaO, 0,17 MgO, 0,42 TiO₂, 0,15 MnO, 0,006 P, 0,004 S, 1,85 C (суммарное количество примесей — 4,58%).

Недостатками такого способа является то, что в процессе металлизации применяется высокочистый, содержащий следы фосфора концентрат железорудного материала с высоким содержанием железа (67–69%), что требует значительных затрат на предварительное измельчение, обогащение и очистку железоруд-

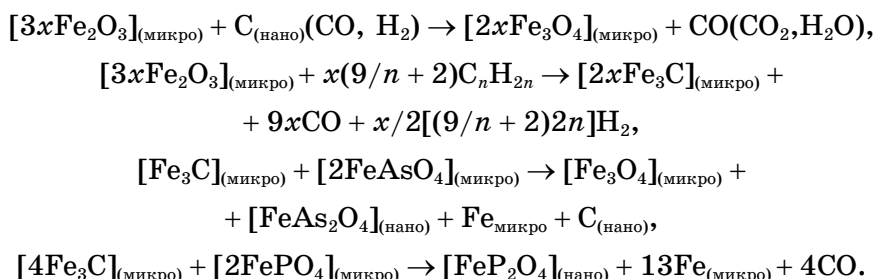
ного сырья. При этом получаемый металлизированный продукт содержит 87,63% металлического железа и 4,58% примесей, то есть загрязняющих веществ в нем даже больше, чем в исходном железном концентрате (3,38%). Кроме того, способ не предусматривает очистку железорудного материала от фосфора и мышьяка для удаления которых также необходимы значительные капитальные, материальные и энергетические затраты и новые ещё не разработанные технологии.

В предложенном на основе проведённых исследований способе переработки железных руд, особенно осадочного происхождения, учитывающем установленные условия метаморфизма и трансформации железосодержащих горных пород в нано- и микроструктурированные железооксидные рудные материалы, используются такие материалы без предварительного их обогащения [13]. По разработанной экологически чистой безотходной технологии полученный при обжиге спек разделяется сухим обогащением на магнитную фракцию и фракцию неметаллических алюмосиликатных примесей, обладающих вяжущими свойствами и пригодными в качестве добавок к цементам. Магнитная фракция подвергается мокрому щелочному обогащению с отделением примесей фосфора и мышьяка [17]. Так, например, из мышьяк- и фосфорсодержащих ЖСРМ, восстановленных при 1200°C, получен после обогащения, разделения и очистки спека концентрат следующего химического состава (масс.%): 95,71 Fe, 0,09 P, 0,007 As, 0,002 S, 0,23 CaO, 0,32 Al₂O₃, 1,73 SiO₂, 1,84 C (табл.). Такие результаты были получены с учётом геологических и техногенных трансформаций ЖСРМ с образованием наноструктурных химически модифицированных соединений фосфора и мы-

ТАБЛИЦА. Влияние концентрации NaOH и NaCl на процесс очистки металлизированного обогащённого спека.⁹

Концентрация, %		Химический состав очищенного концентрата, %						
NaOH	NaCl	Fe	Mn	P	As	S	Al ₂ O ₃	SiO ₂
4	—	91,99	0,23	0,18	0,03	0,005	0,48	2,71
6	—	93,28	0,15	0,11	0,02	0,004	0,37	2,03
8	—	95,04	0,07	0,10	0,01	0,003	0,35	1,87
12	—	95,71	0,00	0,09	0,01	0,002	0,32	1,73
14	—	95,79	0,00	0,09	0,01	0,002	0,33	1,75
12	10	95,75	—	0,10	0,009	—	—	—
12	15	95,81	—	0,08	0,007	—	—	—
12	20	95,99	—	0,07	0,007	—	—	—
12	30	96,03	—	0,06	0,007	—	—	—
12	35	95,77	—	0,07	0,008	—	—	—

шьяка. Максимальное извлечение мышьяка и отделение его от фосфора достигается в условиях каталитического твердофазного карбидного трансформирования оксида железа при 600–980°C с параллельным восстановительным процессом образования магнетита и переходом нерастворимых соединений As и P(V) в щелочерастворимые соединения As и P(III), например по схеме:



Из анализа результатов, представленных в табл., можно сделать следующие выводы: предложенная технология, учитывающая геологическую историю трансформации ЖСРМ, может быть использована для разделения компонентов, обогащения и очистки металлизированного железорудного сырья практически любого состава и происхождения, начиная от металлургических шламов и заканчивая высокообогащенными концентратами. Наиболее эффективно использование способа для переработки осадочных руд биокolloидного происхождения, обычно содержащих 30–40% железа и марганца, а также повышенные содержания таких примесей, как фосфаты, арсенаты и силикаты. Переработка подобных руд другими известными методами оказывается неэффективной из-за недостаточного удаления соединений фосфора и мышьяка.

Подводя итоги проведённого исследования, следует отметить, что с использованием достижений физико-химической геомеханики, коллоидной и биокolloидной химии, а также результатов рентгенофазового, термографического, электронно-микроскопического, реологического и микробиологических методов установлены взаимосвязи механохимических, нанохимических и микробиологических процессов метаморфизма горных пород с их переходами в нано- и микроструктурированные железооксидносиликатные материалы и с последующими процессами их переработки, разделения и применения. Процессы метаморфизма на промежуточном этапе трансформации горных пород в железные руды протекают также с образованием наноструктурированных пелагических осадков с участием микроорганизмов и выделяемых ими поверхностно-активных продуктов метаболизма. Определены оптимальные эффективные пути осуществления восстановительного обжига осадочных наноструктурированных железосиликатных руд с после-

дующим разделением и очисткой полученных компонентов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитический (с использованием достижений физико-химической геомеханики) и экспериментальный анализ полученных данных позволил установить основополагающую роль геомеханических, механохимических, биогеохимических и биокolloидных процессов в метаморфических наноструктурных трансформациях горных пород в ЖСРМ. Отмечено лимитирующее влияние существовавших или образующихся по ходу процессов нано- и микроструктур на преобразования в ЖСРМ на всех взаимосвязанных стадиях природных и техногенных трансформаций. Показано, что природные и техногенные процессы в ЖСРМ протекают практически одинаково в соответствии с установленными закономерностями, что позволило дать научное обоснование методов переработки и очистки ЖСРМ от кремнезёмсодержащих примесей и примесей мышьяка, фосфора и серы.

Практическая реализация разработанных на основе выполненных исследований технологических методов позволила получить из бедных железосиликатных рудных материалов высокообогащённые магнетитовые и железосодержащие (металлизированные) концентраты, очищенные на 90–95% от мышьяка и фосфора [9, 11, 17], а также разработать прогнозные рекомендации для совершенствования процессов переработки ЖСРМ с использованием нанотехнологий.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Олейник, А. В. Панько, М. А. Ильяшов и др., *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**: 587(2011).
2. V. A. Oleinik, A. V. Panko, I. G. Kovzun et al., *Nanomaterials: Application and Properties*, vol. **2**, No. 3, p. 03AET10 (3pp) (2013).
3. В. А. Олейник, Е. В. Аблец, А. В. Панько и др., *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**: 779 (2014).
4. A. V. Panko, E. V. Ablets, I. G. Kovzun, and M. A. Ilyashov, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Material Science and Engineering*, **8**: 35 (2014).
5. A. V. Panko, I. G. Kovzun, Z. R. Ulberg et al., *Nanoplasmonics, Nanooptics, Surface Studies and Applications. Springer Proceedings in Physics* (2015), vol. **183**, p. 233.
6. A. V. Panko, I. G. Kovzun, Z. R. Ulberg et al., *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies and Applications. Springer Proceedings in Physics* (2016), vol. **183**, p. 163.
7. V. A. Oleinik, A. V. Panko, I. G. Kovzun et al., *Proceedings of the International Conference 'Nanomaterials: Applications and Properties'*,

- vol. 5, No. 3, p. 02NABM01 (4pp) (2016).
8. I. G. Kovzun and N. N. Pertsov, *Nanoscience: Colloidal and Interfacial Aspects* (London–New York: Taylor and Francis Group: 2010), vol. 184, p. 523.
 9. *Минералы Украины* (Ред. Н. Р. Щербак) (Киев: Наукова думка: 1990).
 10. *The Encyclopaedia of Mineralogy. Encyclopaedia of Earth Sciences* (Ed. K. Frye) (Pennsylvania: Hutenshinson Ross Publishing Company: 1981).
 11. Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков, *Металлургия железа* (Москва: Академперидика: 2007).
 12. *Лечебные грязи (пелоиды) Украины* (Ред. М. В. Лобода, К. Д. Бабов, Т. А. Золотарёва, Е. М. Никипелова) (Киев: Куприянова: 2006).
 13. А. Ю. Розанов, Г. А. Заварзин, *Вестник РАН*, **67**: 241 (1997).
 14. Н. В. Перцов, *Коллоидный журнал*, **63**: 214 (2001).
 15. В. А. Емельянов, *Основы морской геоэкологии* (Киев: Наукова думка: 2003).
 16. В. А. Прокопенко, И. Г. Ковзун, З. Р. Ульберг, *Вісник НАН України*, № 10: 52 (2014).
 17. Патент 2412259 РФ (Опубликован 27.02.2011. Бюл. № 6).

REFERENCES

1. V. A. Oleinik, A. V. Panko, M. A. Ilyashov et al., *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **33**: 587 (2011) (in Russian).
2. V. A. Oleinik, A. V. Panko, I. G. Kovzun et al., *Nanomaterials: Application and Properties*, vol. 2, No. 3, p. 03AET10 (3pp) (2013).
3. V. A. Oleinik, E. V. Ablets, and A. V. Panko, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **36**: 779 (2014) (in Russian).
4. A. V. Panko, E. V. Ablets, I. G. Kovzun, and M. A. Ilyashov, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Material Science and Engineering*, **8**: 35 (2014).
5. A. V. Panko, I. G. Kovzun, Z. R. Ulberg et al., *Nanoplasmonics, Nanooptics, Surface Studies and Applications. Springer Proceedings in Physics* (2015), vol. 183, p. 233.
6. A. V. Panko, I. G. Kovzun, Z. R. Ulberg et al., *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies and Applications. Springer Proceedings in Physics* (2016), vol. 183, p. 163.
7. V. A. Oleinik, A. V. Panko, I. G. Kovzun et al., *Proceedings of the International Conference 'Nanomaterials: Applications and Properties'*, vol. 5, No. 3, p. 02NABM01 (4pp) (2016).
8. I. G. Kovzun and N. N. Pertsov, *Nanoscience: Colloidal and Interfacial Aspects* (London–New York: Taylor and Francis Group: 2010), vol. 184, p. 523.
9. *Minerals of Ukraine* (Ed. N. R. Shcherbak) (Kiev: Naukova Dumka: 1990) (in Russian).
10. *The Encyclopaedia of Mineralogy. Encyclopaedia of Earth Sciences* (Ed. K. Frye) (Pennsylvania: Hutenshinson Ross Publishing Company: 1981).
11. Yu. S. Yusfin, N. F. Pashkov, *Metallurgiya Zheleza* [Metallurgy of Iron] (Moscow: ИКС 'Академперидика': 2007) (in Russian).
12. M. V. Loboda, K. D. Babov, T. A. Zolotareva, and E. M. Nikipelova,

- Lechebnyye Gryazi Ukrainy* [Therapeutic Muds of Ukraine] (Kiev: Kupriyanova: 2006) (in Russian).
13. A. Yu. Rozanov and G. A. Zavarzin, *Vestnik RAN*, 67: 241 (1997) (in Russian).
 14. N. V. Pertsov, *Kolloidnyi Zhurnal*, 63: 214 (2001) (in Russian).
 15. V. A. Emelyanov, *Osnovy Morskoy Geoekologii* [Marine Geoecology Bases] (Kiev: Naukova Dumka: 2003) (in Russian).
 16. V. A. Prokopenko, I. G. Kovzun, and Z. R. Ulberg, *Vestnik NAN Ukrainy*, No. 10: 52 (2014) (in Russian).
 17. Patent 2412259 RF (Published 27.02.2011. Bull. No. 6) (in Russian).

¹*F. D. Ovcharenko Institute of Biocolloid Chemistry, N.A.S. of Ukraine, 42, Academician Vernadsky Blvd., 03142 Kyiv, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Peremohy Ave., 37, Bldg. 4, 03056 Kyiv, Ukraine*

³*State Institution 'Ukrainian Research Institute of Medical Rehabilitation and Balneology', 6, Lermontovskiy Lane, 65014 Odesa, Ukraine*

¹ Fig. 1. Rheograms of IOSOM (*a, б*). Dependence of the viscosity (η) on the shear stress (P) of sedimentary IOSOM (σ). Suspension humidity—45%. (●)—'direct' curves, (○)—'reverse' curves.

² Fig. 2. XRD pattern of sedimentary IOSOM: G—Goethite FeO(OH), Saponite—saponite.

³ Fig. 3. Thermograms of sedimentary IOSOM.

⁴ Fig. 4. The thermograms of IOSOM mixture with coal at a ratio of 4:1 characterizing the magnetite forming reaction $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}$ with the beginning of the metallization process above 950°C.

⁵ Fig. 5. Influence of both the chemical composition and the concentration of silicate nanoclusters on the viscosity of IOSOM suspensions: 1— $(\text{Si}_3\text{O}_7^{2-})_n$; 2— $(\text{Si}_2\text{O}_5^{2-})_n$; 3— $(\text{SiO}_3^{2-})_n$; 4— $(\text{SiO}_4^{4-})_n$.

⁶ Fig. 6. Scheme of transformation of the natural and technogeneus iron rocks into pelitic sediments, jaspilites and metallic materials.

⁷ Fig. 7. Atomic-force image of metallic magnetic particles formed at 1200°C as in Fig. 6 (stage 5).

⁸ Fig. 8. Micrographs of structures formed at various stages (1, 2, 3, 4, 5) of process according to the scheme of Fig. 6.

⁹ TABLE. Effect of NaOH and NaCl concentration on purification process of metallized enriched sinter.