

тання в якості складаючої штучного профілю підстилаючої породи глинистого водотриву з високим вмістом монтморіллону. 2. Виходячи із наведених розрахункових даних і результатів польових дослідів на Камиш-Бурунському стаціонарі для зони Сухого Степу перспективною була визначена наступна технологія утворення рекультивованих земель. На сплановану поверхню промислових відвалів наносять водотривний шар сіро-зеленої глини (40 см), потім – шари лесоподібного суглинку (50 см) та насипного шару чорнозему (50 см). 3. Впровадження варіанту глинистий водоопір + 10см піску + 30см лесоподібного суглинку на шламосховищах дає можливість підвищити гідрологічний об'єм пропонуемого профілю варіанту рекультивациі у 3 рази.

Бібліографічні посилання

1. Перспективы использования горных пород Керченского железорудного месторождения для создания высокоплодородных рекультивированных земель / Н. Т. Масюк, Н. Н. Харитонов, А. А. Мыщук // Агрехимия і ґрунтознавство. – 1994. – Вип. 57. – С. 17–22.
2. Меліоративна гідрогеологія / І. Є. Жернов, А. Г. Солдак, П. Ю. Куш. – К., 1971. – 331 с.
3. Прогноз міграції солей для тришарової моделі рекультивациі порушених земель у Західному Донбасі / М. М. Харитонов, Г. П. Євграфікіна // Екологія і природокористування. – 2005. – Вип. 8. – С. 199–201.

Надійшла до редколегії 30.11.07

УДУ 550.800.18:553.623

Н. П. Шерстюк, Т. В. Воронина, Л. А. Носова, И. А. Власова

Днепропетровский национальный университет

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ ГИПЕРГЕНЕЗА РАЙОНОВ РАЗРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Розглянуті основні стадії гіпергенезу з утворенням нових мінеральних фаз на території Північного гірничо-збагачувального комбінату, які можуть призвести до порушення екологічної рівноваги районів розробки залізорудних родовищ.

Введение. Отработка месторождений полезных ископаемых, ведение на них горнотехнических и технологических работ приводят к активным физико-химическим процессам, в результате которых образуются разнообразные техногенные минералы и минеральные образования.

Техногенез определяется совокупностью геоморфологических и минералогеохимических процессов, вызванных производственной деятельностью человека. Особенно интенсивно техногенные процессы протекают в объеме зоны гипергенеза рудных месторождений, т. е. в окисленных рудах. По существу, они переформируют сформированную прежде зону гипергенеза, расширяя ее границы, значительно в (15–20 и более раз) углубляя окислительные процессы и осуществляя вынос за пределы месторождений продукты окисления руд.

Горные породы, слагающие земную кору, подвергаются денудации в результате их предварительного выветривания. Этот процесс приводит к появлению рых-

© Н. П. Шерстюк, Т. В. Воронина, Л. А. Носова, И. А. Власова, 2007

лых (дисперсных) новообразований зоны гипергенеза, существенно отличных по своим физическим свойствам от исходных коренных пород [1].

Б. Б. Полынов [2] выделил четыре стадии выветривания, характеризующие единый протекающий во времени непрерывный процесс гипергенеза. Выветривание – это разрушение пород на земной поверхности и их превращение в продукты, которые являются более устойчивыми в новых физико-химических условиях. Многие породы первоначально образовывались при высоких давлениях и температурах и при отсутствии воды и воздуха. Продукты выветривания могут сильно различаться по составу, и даже те из них, которые при одних условиях являются устойчивыми, при изменении условий могут стать неустойчивыми.

Первая стадия выветривания характеризуется преобладающей ролью физических факторов с образованием крупнообломочных и мелкозернистых продуктов механического распада массивных горных пород.

Вторая стадия характеризуется щелочной реакцией среды за счет извлечения в раствор оснований при гидролизе минералов. На этой стадии образуются вторичные минералы в результате окисления, гидратации, гидролиза и карбонизации первичных минералов. Среди вторичных алюмосиликатов на этой стадии преобладают минералы группы монтмориллонита и нонтронит. При относительном избытке в породах кальция в продуктах выветривания происходит накопление карбоната кальция, нередко образующего корку на обломках массивных пород, Б. Б. Полынов именует эту стадию «обызвесткованной» или насыщенной сиаллитной корой выветривания; наибольшее распространение она имеет в условиях умеренного климата при выветривании изверженных и метаморфических пород.

Третья стадия – остаточной ненасыщенной сиаллитной коры выветривания – характеризуется дальнейшим выносом из продуктов выветривания щелочных и щелочноземельных элементов, вследствие чего реакция среды становится кислой. В этой обстановке среди вторичных алюмосиликатов преобладают галлуазит и каолинит. Развитие этой стадии выветривания имеет место в условиях замедленной денудации и относительно более обильного увлажнения.

В четвертой стадии образуется остаточная аллитная кора выветривания, характеризующаяся накоплением окислов кремния, железа и алюминия. Развитие ее определяется сочетанием активного химического выветривания с замедленной денудацией в условиях жаркого и влажного климата.

В едином и сложном процессе выветривания условно выделяются две основные взаимосвязанные формы: 1) физическое выветривание; 2) химическое выветривание.

Важнейший фактор химического выветривания – вода, которая в той или иной степени диссоциирована на положительно заряженные водородные ионы (H^+) и отрицательно заряженные гидроксильные ионы (OH^-). Это определяет ее возможность вступать в реакцию с кристаллическим веществом. Высокая концентрация водородных ионов в растворах способствует ускорению процессов выветривания.

Химическое воздействие на горные породы оказывают находящиеся в воде растворенные ионы, такие, как HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . Эти ионы также могут замещать заряженные атомы в кристаллах или взаимодействовать с ними, что может приводить к нарушению первичной кристаллической структуры минералов. Процессы, протекающие при химическом выветривании, заключаются в сле-

дующих основных химических реакциях: окислении, гидратации, растворении, гидролизе, карбонитизации, восстановлении [2].

Цель исследований. Отработка рудных месторождений в изученных районах Кривбасса ведется карьерами и штольнями, которые не только оставляют огромные пустоты (карьеры), насыпи – отвалы (у штолен), а также появление складированных руд – огромных хвостохранилищ. В хвостохранилищах складированы те руды, процентное содержание добываемых элементов в которых ниже промышленного, необходимого по технологии, либо складированы отработанные руды (хвосты), после извлечения полезных компонентов. Здесь складированы порой огромные количества (до сотен и десятков тысяч тонн) такой руды, занимающие иногда площади до десятков, сотен квадратных метров. Все те процессы, которые происходят с рудами в зоне гипергенеза, не прекращаются, а усиливаются в хвостохранилищах и отвалах штолен благодаря возрастающему механическому воздействию и доступу кислорода и воды. Происходит специфическое минералообразование, связанное с техногенными растворами. Техногенные растворы, имеющие значительные масштабы на изученных рудопрооявлениях, представляют собой «жидкие руды» – попутное поликомпонентное сырье, в котором минералы находятся в технологически оптимальной форме. Там, где «жидкие руды» не подвергаются промышленной переработке, они активно выносятся в грунтовые воды.

В настоящее время в бассейне известно около 300 залежей богатых руд, которые в пределах бассейна объединены в 25 месторождений. В настоящее время на рудниках с подземной добычей сырья работы ведутся в интервалах глубин 800–1350 м, а подготовительные работы – на предельных для действующей технологии глубинах.

Полоса месторождений руды тянется в Кривбассе на расстояние около 100 км вдоль реки Ингулец и его притоков – Саксагани и Желтой. Ее ширина колеблется от 0,5 до 3,0 км, а в центральной части достигает 6–7 км. Вдоль этой полосы расположены карьеры, рудники, горнообогатительные комбинаты, металлургический завод, город Кривой Рог и рабочие поселки [3].

Глубина самых крупных карьеров по добыче железной руды превышает 200 м. Одни карьеры (Первомайский, ИНГОКа, ЮГОКа и другие) имеют округлую форму с шириной карьерного поля в самой широкой его части до 2,0–2,5 км. Другие (Анновский, №1 ИНГОКа и другие) вытянутые в одном направлении, ширина их карьерного поля намного меньше длины. Она равна 0,5–0,75 км при длине 3,5–4,75 км. Кроме крупных карьеров в полосе добычи железной руды расположено много карьеров, имеющих значительно меньшие размеры и глубину.

Краткая характеристика объектов горно-добывающей и обогатительной промышленности Кривбасса приведена в табл. 1 и 2 [4].

Таким образом, на территории Кривбасса можно отметить следующие физико-химические процессы зоны гипергенеза: окисление и гидратация (в хвостохранилищах) и гидролиз алюмосиликатов в подземных водах на территории обогатительных фабрик.

С помощью рентгеноструктурного метода анализа определен литологически и минеральный состав четвертичных отложений территории Северного горно-обогатительного комбината. Основную часть пробы составляет кварц, а также натриевые и калиевые полевые шпаты, пироксен. В результате гидролиза натриевые и калиевые полевые шпаты могут преобразоваться в монтмориллониты в кислой среде.

Изложение материала. Одним из типовых объектов в описанной проблеме, есть хвостохранилище Северного горно-обогатительного комбината (СевГОКа),

которое расположено в северной части г. Кривого Рога в балке Петрикова. Введено в эксплуатацию в 1963 р. Склоны и ложе балки в границах хвостохранилища представлены новопетровско-межигорскими песчаными и четвертичными суглинистыми отложениями. Хвостохранилище выполнено без противофильтрационной защиты.

Таблица 1

Характеристика шахт Криворожья

Название ГОКов	Название техногенного объекта	Площадь, га	Объем, млн. т.	Минерализация, г/дм ³
Северный	хвостохранилище	1962	685	12,0
Центральный	хвостохранилище	1812,8	406,7	3,9
Южный, Новокриворожский	хвостохранилище «Миролубовское»	2850	1119,5	12,2-28,4
	хвостохранилище «Объединенное»			
	хвостохранилище «Войково»			
	ставок-накопитель у б. Свистунова		6,0	28,5
Ингулецкий	хвостохранилище	736	617,26	3,4

Таблица 2

Характеристика хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов Криворожья

Шахта	Абс. отм. горизонта, м	Минерализация, г/дм ³
Им. Фрунзе	-314,8-804	3,5-12,7
Большевик	-624,8-743	3,3-33,1
Октябрьская	-898,8-1037,6	14,1-83,9
Комунар-Победа	-380-540	6,5-11,5
Саксагань		2,3-47,9
Гигант	-331,5-380	1,6-6,6
Дренажная -2	-416,8	8,3
Родина	-931,8-1159,5	19,0-133,7
Северная		4-47,9
Им. Артема №1		4,8-26,7
Им. Валявка-Северная		7,2-12,8
Южная		до 3
Новая		2,6-3,9

Основная его гребля расположена на расстоянии 2,5 км от устья балки Петрикова, которая впадает в р. Саксагань. Площадь его составляет 1295 га (из них на само хвостохранилище приходится 980,0 га, а на ставок оборотной воды - 315,0 га). Длина - 17,3 км (хвостохранилище - 11,0 км, ставок - 6,3 км). Замыкает контур разделительная гребля длиной 1,2 км, которая отделяет ставок оборотного водоснабжения от самого хвостохранилища.

Территория в геоморфологическом отношении приурочена к степной аккумулятивно-денудационной равнине с общим уклоном поверхности рельефа в юго-восточном направлении к долине р. Саксагань. Абсолютные отметки поверхности изменяются от 130,0 - 140,0 м на водоразделах до 55,0 - 60,0 м в долине р. Саксагань. Большая часть территории, которая прилегает к хвостохранилищу, используется как пахотные земли.

Зона исследования характеризуется присутствием таких водоносных горизонтов:

- водоносный горизонт четвертичных отложений в лессовидных суглинках и в аллювиальных отложениях поймы р. Саксагань;
- водоносный горизонт неоген-палеогеновых отложений;
- водоносная зона трещиноватых кристаллических пород.

В лессовидных суглинках до эксплуатации хвостохранилища встречались отдельные линзы «верховодки» мощностью 2 – 3 м, которые залежали на водоудерживающих красно-бурых глинах и суглинках. Таким образом, особенностью данного района есть то, что до строительства хвостохранилища в 1962 г. здесь практически отсутствовал водоносный горизонт в четвертичных суглинках. Образовался он в результате хозяйственной деятельности человека и имеет техногенное происхождение.

Исследования были проведены по результатам базы данных химического анализа воды 84 скважин расположенных на территории СевГОКа.

По результатам исследования были выделены зоны с разными кислотно-щелочными условиями: в южной и юго-восточной части территории от хвостохранилища наблюдаются переходы с нейтральной в кислую среду (рис.) от рН 7,8 до рН 4,8; в восточной части установились щелочные условия (от рН 5,9 до рН 10,0; в юго-восточной части исследуемой территории наблюдаются скачкообразные изменения кислотно-щелочных условий.

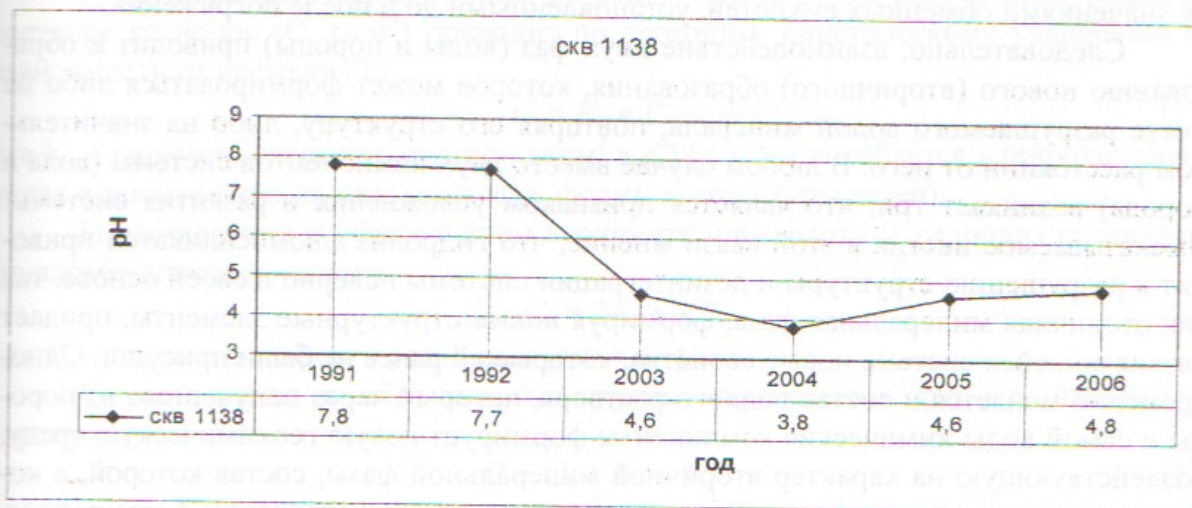


Рис. Временная динамика изменения кислотно-щелочных условий

Известно, что природное разрушение смектитовых минералов (монтмориллонит, нонтронит и др.) совершается в кислых растворах путем гидролиза связей Si и Al с кислородом. При этом особо уязвим мостиковый кислород, содержащий кремнекислородный и алюмокислородный тетраэдры в тетраэдрических сетках смектитовой структуры. Деструктирование смектита можно также представить в виде процесса окисления его электронной структуры в условиях кислотно-основного или донорно-акцепторного взаимодействия минерала с кислым раствором – акцептором электронов, в котором он выступает в роли основания или донора электронов.

Глинистые минералы обычно состоят из отрицательно заряженной повторяющейся структурной решетки. Последняя имеет совершенно определенные отрицательно заряженные места, занятые одно- или двухзарядными катионами. От-

рицательная решетка состоит, в основном, из листоватых структур алюмосиликата и способные к обмену катионы располагаются в межплоскостных положениях или примыкают к поверхностям частиц. Если частицы алюмо-силикатов поместить в водный раствор, то часть межслоевых и поверхностных катионов может быть удалена и быстро замещена катионами из раствора. Частицы минерала при этом регенерируются без существенных структурных нарушений. Однако, сама отрицательно заряженная решетка не остается инертной по отношению к воздействию водного раствора, пока присоединяются и удаляются катионы. Например, если магнезиальный монтмориллонит поместить в богатый натрием раствор, так что, по существу, все его обменные места будут заняты натрием, он не будет равновесным в отношении всех возможных химических реакций. Некоторое количество магния, находящегося в восьмерной координации, обычно переходит в раствор, а некоторое количество ионов натрия входит в структуру решетки. Имеется мало данных о скорости, с которой происходят такие изменения, но за какой-то период времени решетка должна измениться. Более того, в ходе достижения полного равновесия все компоненты отрицательной решетки должны частично перейти в окружающий раствор. Это значит, что если вещество остается в воде, то должно происходить некоторое растворение решетки, возможно сопровождающееся перестройкой ее поверхности. Такой эффект наблюдается при воздействии кислых растворов на алюмосиликаты: в связи с высокой концентрацией H^+ раствор обычно быстро разрушает их структуру, и погружение в сильную кислоту, как правило, приводит к расхождениям между значениями обменных емкостей, установленными до и после погружения.

Следовательно, взаимодействие двух фаз (воды и породы) приводит к образованию нового (вторичного) образования, которое может формироваться либо на месте разрушаемого водой минерала, повторяя его структуру, либо на значительном расстоянии от него. В любом случае вместо двух компонентов системы (вода и порода) возникает три, что является признаком усложнения и развития системы. Высказываемое иногда в этой связи мнение, что гидролиз алюмосиликатов приводит к разрушению структуры и дезинтеграции системы неверно в своей основе, так как вторичная минеральная фаза, формируя новые структурные элементы, придает развивающейся системе новые свойства, которые ей ранее не были присущи. Одновременно меняется и состав водного раствора, который через полученные из породы и самой воды химические компоненты формирует новую геохимическую среду, воздействующую на характер вторичной минеральной фазы, состав которой, в конечном счете, также меняется. Вместо каолинита при выветривании формируется, скажем, монтмориллонит, что еще более усложняет систему, так как появляется дополнительный структурный элемент, лучше приспособленный к конкретным условиям среды и отражающий энергетически более выгодное состояние системы.

Формирующиеся вторичные минеральные фазы являются продуктом среды. При этом сама среда выступает не чем-то внешним относительно исследуемой системы, а продуктом ее эволюции, который, однако, оказывает непосредственное воздействие на направленность развития самой системы. Механизм этого воздействия состоит в следующем. Геохимическая среда контролирует состав формирующейся вторичной минеральной фазы. Но, когда та выпадает из раствора, меняется среда. Измененная среда приводит к выпадению другой минеральной фазы, что сказывается на характере ее самой. Растворяющаяся порода, в свою очередь, также влияет на среду, восстанавливая связанные вторичной фазой химические элементы, например, кремний и алюминий, формирующие каолинит. В этом состоит одно из важнейших противоречий рассматриваемой системы, которое и определяет спо-

способность ее к непрерывному эволюционному развитию, присущему самоорганизующимся системам. Среда, таким образом, выступает как неразрывная часть эволюции самой системы, как ее продукт, эволюционирующий вместе с ней. При этом становление системы и среды выступает как единое целое.

Образование и рост вторичных минеральных фаз в строгом единстве с геохимической средой есть саморазвивающийся процесс, так как он протекает в направлении от частей разрозненных к частям связанным, что по [5], является важнейшим признаком самоорганизующейся системы.

По И. Пригожину [6], любой объект, пребывающий в сильно неравновесном термодинамическом состоянии, обнаруживает известный набор свойств нелинейной системы. Синергетика развивает представления о принципиальной нелинейности самоорганизующихся процессов, которая выступает одним из ведущих признаков любых самоорганизующихся систем. Это свойство характерно для системы вода – порода. Показателем нелинейности может выступать кинетика взаимодействия алюмосиликатов с водой. Экспериментально установлено, что при растворении полевых шпатов выделяется, по крайней мере, четыре стадии развития процесса, протекающие с различной скоростью:

1) быстрый поверхностный обмен катионов на ионы водорода с неустановленной математической зависимостью перехода элементов в раствор. Вероятно, эта стадия растворения приводит к формированию слоя выщелачивания мощностью как минимум 1000 Å;

2) растворение с образованием гиббсита, при котором рост концентраций в растворе катионов (C , г/см³) приводит по сложному кинетическому уравнению в зависимости от времени (T)

$$C = K_e \cdot T^n, \quad (1)$$

где K_e – параметр скорости реакции, г/(см² • с ^{n}) ($n < 1$ и колеблется в широких пределах в зависимости от типа минерала, формы и структуры зерен);

3) растворение с образованием каолинита, при котором гидролиз протекает по параболическому закону

$$C = C_0 + 2K_p \cdot T^{1/2}, \quad (2)$$

где K_p – параметр скорости реакции, г/(см² • с^{1/2});

4) растворение с образованием других минеральных фаз по линейному закону

$$C = C_0 + K_0 \cdot T, \quad (3)$$

где K_0 – параметр скорости реакции, г/(см² • с).

Как видим, линейный характер процесса устанавливается только на четвертой стадии инкогруэнтного растворения. Однако нельзя не понимать, что время опыта в лабораторных условиях ограничено и совершенно очевидно, что в реальной обстановке линейность процесса не может оставаться постоянной, скорее всего, это только небольшой отрезок по времени в эволюции системы, который должен переходить в какой-то новый этап. Ведь с ростом мощности вторичной минеральной фазы и изменением ее состава, как было показано выше, характер взаимодействия воды с первичной горной породой претерпевает изменения. Следовательно, линейность выступает только частным случаем в целом Нелинейного процесса гидролиза алюмосиликатов, а значит и взаимодействия вода – порода.

Экспериментальные данные убедительно показывают, что гидролиз алюмосиликатов уже на первых стадиях приводит, вследствие нестехиометрического выноса элементов, к образованию выщелоченного слоя разной толщины в зависимо-

сти от конкретных условий среды и характера поверхности минерала. Однако этот выщелоченный слой не играет существенной роли в контроле скорости реакций гидролиза. Параболическая зависимость выноса элементов, вероятно, связана не с влиянием выщелоченного слоя, а с наличием мелких частиц в материале, который использовался в экспериментах.

Подчеркивая незначительную роль выщелоченного слоя в кинетике растворения алюмосиликатов, нельзя этот же вывод переносить на формирующийся при этом новообразованный минеральный слой. Так, экспериментально установлено, что быстрый обмен К полевого шпата при рН от 4 до 10 приводит к росту аморфного слоя $Al(OH)_3$ и замедлению диффузии через него катионов и кремнезема. С ростом количества К в полевом шпате возрастает и скорость выделения кремнезема, хотя его конечная концентрация в растворе не изменяется, что говорит об удалении кремнезема из раствора путем образования аморфного силиката типа каолинита.

Следовательно, имеющиеся экспериментальные данные однозначно свидетельствуют об отсутствии каких-либо ограничений по принципиальной возможности геологического длительного растворения алюмосиликатов водой с образованием новых минеральных фаз. Вторичные образования, в зависимости от их количества и состава, структурных, текстурных и кристалломорфных особенностей оказывают воздействие через диффузионный механизм на скорость растворения первичных минералов, что постоянно нарушает линейность развивающегося процесса, которая сохраняется поэтому только на отдельных отрезках времени и представляет собой частный случай.

Формирование вторичной минеральной фазы представляет собой, в сущности, зарождение качественно новой системы, состоящей из новых (дополнительных) структурных элементов, которые более упорядочены, приспособлены к условиям среды и поэтому из локальной области (точки зарождения), постепенно расширяясь, захватывают или отвоевывают все новое и новое геологическое пространство.

Выводы. Очевидно, все, что связано с обработкой месторождений, гипергенными процессами, техногенезом и рудничными водами, не проходит безрезультатно для окружающей среды. Накопленные в техногенных водах элементы выносятся за пределы рудопроявлений и рассеиваются в грунтовых и родниковых, а следовательно, в питьевых водах. Эти процессы, неизбежно, нарушают экологическое равновесие в районе. Происходит губительное загрязнение окружающей среды.

Библиографические ссылки

1. Оллиер К. Выветривание: Пер. с англ. – М., 1987. – 126 с.
2. Польшов Б. Б. Кора выветривания // Избр. труды. – М., 1956. – 255 с.
3. Физико-географический очерк территории Криворожского горнопромышленного района. Отчет Криворожской геологоразведовательной партии Л.Н. Булова. – Кривой Рог, 1990. – 125 с.
4. Багрій І. І. Геоекологічні проблеми Криворізького басейну в умовах реструктуризації гірничо-видобувної галузі. – К., 2002. – 134 с.
5. Соловов А. П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М., 1988.
6. Пригожин И. термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуации. – М., 1973. – 380 с.

Надійшла до редколегії 7.02.08