

АКТИВИЗАЦИЯ ГИПЕРГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ РАЙОНОВ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ (НА ПРИМЕРЕ КРИВОРОЖСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО БАССЕЙНА)

Аннотация.

Актуальность и цели. В результате активной добычи и обогащения железных руд в Кривбассе в настоящее время извлечены из недр громадные объемы первичных невыветренных пород и минералов, которые являются неустойчивыми в гипергенных условиях. В воде водных объектов происходят процессы гидролиза силикатов и алюмосиликатов, осаждения карбонатов, что приводит к изменению химического состава воды в реках, прудах и водохранилищах.

Материалы и методы: полевые экспедиционные гидрохимические исследования на территории Криворожского железорудного бассейна (1978–2013 гг.); физико-химические эксперименты по изучению направленности развития гидрохимических процессов, а именно, эксперименты по фильтрации через образцы породы определенного минерального состава водных растворов различного химического состава. Обработка и интерпретация полевой гидрохимической информации проводилась с использованием методов математической статистики (критерии однородности и независимости, корреляционный и регрессионный анализы), результаты физико-химических экспериментов сравнивались с термодинамическими расчетами, выполненными с помощью компьютерных средств, а также использовалось прикладное программное обеспечение STATIST, разработанное под руководством доктора технических наук, профессора О. Г. Байбуза.

Результаты. В воде водных объектов Кривбасса происходят нетипичные гидрохимические процессы: гидролиз хлорита до монмориллонита (в водоемах пяти хвостохранилищ), от монмориллонита до каолинита (в прудах, в воде р. Саксагань) и осаждение кальцита (в воде пяти водоемов хвостохранилищ, большинства прудов, р. Саксагань и Ингулец до 2000 г.).

Выводы. На территории добычи и обогащения железных руд усиливаются процессы химического выветривания. Характерным для всех водных объектов на данной территории является процесс гидролиза силикатов и алюмосиликатов, который приводит к поступлению в воду ионов магния, увеличению ее минерализации, жесткости, величины водородного показателя. В результате процесса гидролиза нарушаются равновесия в карбонатно-кальциевой системе, что приводит к развитию процесса осаждения карбоната кальция в большинстве водных объектов на территории Криворожского бассейна и изменению химического типа воды в них. Химический состав воды водных объектов районов добычи и обогащения железных руд формируется самопроизвольно и достигает определенных равновесно-неравновесных состояний.

Ключевые слова: добыча полезных ископаемых, химическое выветривание, водные объекты, процессы гидролиза силикатов и алюмосиликатов, осаждение карбоната кальция.

ENHANCED HYPERGENE PROCESSES IN WATER BODIES OF MINING AREAS (BY THE EXAMPLE OF KRIVOY ROG IRON RANGE)

Abstract.

Background. As a result of active mining and concentration of iron ore in Krivbass at the present time there are extracted huge volumes of original unweathered rocks and minerals that are unstable in hypergene conditions. In water bodies there take place the processes of hydrolysis of silicates and aluminum silicates, carbonate precipitation, leading to changes in chemical composition of water in rivers, ponds and reservoirs.

Materials and methods. As materials for the study the author used field expeditional hydrochemical investigations at the Krivoy Rog iron ore range (1978–2013 years); physical-chemical experiments in the orientation of hydrochemical processes development, namely experiments in filtration of aqueous solutions of different chemical composition through rock samples of certain mineral composition. Processing and interpretation of hydrochemical information was carried out using the methods of mathematical statistics (homogeneity and independence tests, correlation and regression analyzes), the results of physico-chemical experiments were compared with thermodynamic calculations performed using computer tools, as well as the STATIST application software, developed under the guidance of the Doctor of engineering sciences, professor O. G. Baybuz.

Results. In water bodies of Kryvbass there occur atypical hydrochemical processes: hydrolysis of chlorite to montmorillonite (in waters of 5 tailing dumps), from montmorillonite to kaolinite (in ponds, in the water of the Saksagan river) and calcite precipitation (water reservoirs of five tailing dumps, most ponds, rivers Saksagan and Ingulets up to 2000).

Conclusions. On the territory of mining and concentration of iron ore the processes of chemical weathering are intensifying. Typical for all water bodies in this area is the hydrolysis of silicates and aluminosilicates, which leads to the flow of magnesium ions to water, increasing its mineralisation, hardness, hydrogen index values. As a result, it disturbs calcium carbonate system of the hydrolysis equilibrium, which leads to the development of the deposition of calcium carbonate in most water bodies in the Krivoy Rog basin and changes in the chemical type thereof. The chemical composition of water bodies in iron ore mining and concentration areas forms spontaneously and reaches certain equilibrium-nonequilibrium states.

Key words: mining, chemical weathering, water objects, processes of hydrolysis of silicates and aluminosilicates, precipitation of calcium carbonate.

В процессе добычи и обогащения железных руд изменяются (возникают, усиливаются или ослабляются) гипергенные процессы. В данной работе рассмотрены процессы, которые происходят в водных объектах Криворожской железорудной зоны.

Современный производственный потенциал железорудной области Украины представлен горнорудными предприятиями по добыче естественно богатых руд подземным способом, пятью горно-обоганительными комбинатами (Северный, Центральный, Южный, Ингулецкий, Полтавский) и горно-обоганительным комплексом АрселорМиттал Кривой Рог, которые добывают и перерабатывают бедные по содержащемуся железу магнетитовые кварциты.

Четыре из пяти горно-обогатительных комбинатов расположены в Криворожском железорудном бассейне. Это наибольший в Украине бассейн богатых железных руд, главный горнодобывающий центр страны, расположенный на территории Днепропетровской области [1].

Промышленный комплекс Криворожской железорудной зоны на начало XXI в. добывает ежегодно до 190 млн т сырой железной руды и перерабатывает ее в 70 млн т товарной продукции. Сейчас здесь действуют девять шахт, четыре горно-обогатительных комбината, которые ведут добычу руды на девяти карьерах. Всего с начала промышленного освоения недр Криворожской железорудной зоны добыто 5,5 млрд т железорудного сырья. Все разведанные запасы железистых кварцитов составляют 21,8 млрд т, а прогнозные ресурсы оцениваются более чем в 19 млрд т.

В самых ранних генетических концепциях, которые касаются гипергенных систем земной коры, в частности зон окисления рудных месторождений, первоочередное значение имели взаимодействия на поверхности разделения жидкой и твердой фаз – взаимодействия минерала, который окисляется, с естественным раствором. Так, в известных работах И. Финча, А. Локка, В. Эммонса [2] формирование зоны гипергенеза сульфидных месторождений непосредственно связывалось с процессами выщелачивания первичных минералов водами, которые насыщены кислородом. «Гидрохимическая» модель формирования зоны гипергенеза, которая стала в истории науки классической, оказала влияние на целенаправленное накопление данных по валовому химическому составу природных вод и экспериментальных результатов по выщелачиванию рудных минералов водными растворами, в которых варьировались кислотность–щелочность, содержимое агентов, которые окисляют, (например, сульфата железа) и разнообразных анионов. Она также содействовала получению первых значений прыжков электрохимического потенциала в двойной электрической прослойке на контакте полупроводниковых минералов (преимущественно сульфидов) с водными растворами (так называемые «ряды напряжения сульфидов»), установленных работами Готтшалка и Бючлера, Уеллса, Нишихари и др. [2]. В дальнейшем интенсивные исследования в области физической химии, электрохимии и гидрохимии естественных вод позволили получить данные реального состояния разнообразных химических элементов в водных растворах (степень окисления, характер комплексообразования, термодинамика взаимодействий).

На современном этапе развития концепции гипергенеза широко используются разработки Д. С. Коржинского [3] о роли окислительно-восстановительных потенциалов в геохимических процессах, которые, соответственно, опираются на принцип окислительно-восстановительных критериев минералогенеза. Например, при окислении сульфидов типа пирита и пирротина переходящие в раствор железо и сера «подзаряжаются»: $\text{Fe}^{+0,91}\text{S}^{-0,91}$ [$\text{Fe}^{+1,78}(\text{S}^{+3,16}\text{O}_4^{-1,24})$], образуя пирротин-сульфатный комплекс.

Значение проблемы, которая касается устойчивости минералов в гипергенных процессах и вторичного минералообразования, чрезвычайно велико. Эта проблема непосредственно связана с научными и практическими вопросами анализа минерального парагенезиса, освоением месторождений с неблагоприятными технологическими свойствами руд, оценкой экологических ситуаций в районах проведения горно-добывающих работ.

В последние годы появились работы, в которых актуальные вопросы техногенеза рассматриваются в пределах геологических регионов или рудных полей [2]. В результате исследований установлена зависимость окисляемости и самовозгораемости разнообразных типов медно-никелевых руд Талнахского месторождения от температуры и влажности среды. Установлен масштаб техногенного преобразования медно-колчеданных руд Урала на примере Красногвардейского месторождения, выявлены особенности техногенных минералов, изученных на сульфидно-каситеритовых месторождениях Комсомольского и Кавалеровского рудных узлов.

Исследования, проводимые в Криворожье, в основном связаны с изучением минералогического состава хвостов в хвостохранилищах Кривбасса [4], образованием донных отложений рек [5], но, к сожалению, в этих публикациях особенности формирования химического состава воды в реках, прудах и водохранилищах региона не рассмотрены.

Целью исследования явился анализ гидрохимических процессов в водных объектах районов добычи и обогащения железных руд (на примере Криворожского железорудного бассейна).

Материал и методика

Для проведения исследования были использованы собственные гидрохимические наблюдения, которые выполнялись в рамках госбюджетных и хоздоговорных тем с 1997 по 2012 г., а также результаты гидрогеологического мониторинга, который проводится Криворожской геолого-гидрогеологической партией с 1978 г. На территории Кривбасса исследовано 45 водных объектов по 65 пунктам наблюдения (рис. 1, табл. 1).

На первых этапах обработки гидрохимической информации применялись методы математической статистики, а именно оценивалась ее однородность по критериям однородности и независимости (критерии совпадения средних и дисперсий, Вилкоксона и Ван-Дер-Вардена). Это дало возможность объединить в одну генеральную совокупность для дальнейших исследований гидрохимическую информацию по водоемам хвостохранилищ Войково, Объединенное, Миролюбовское (ЮГОК).

С помощью корреляционного и регрессионного анализов были определены основные тенденции изменения химического состава воды водных объектов, что позволило сгруппировать их следующим образом: водоемы хвостохранилищ, пруды (с химическим составом воды, близким к природному, техногенному и смешанному (природно-техногенному)), реки.

Выявленные тенденции в изменении химического состава воды водных объектов позволили перейти к определению химических и гидрохимических процессов, которые их обусловили. Так, были изучены процессы окисления пирита, гидролиз силикатов и алюмосиликатов, равновесия в карбонатно-кальциевой системе.

Была разработана методика и выполнены физико-химические эксперименты по фильтрации растворов NaCl , Na_2SO_4 , MgCl_2 , MgSO_4 с минерализацией 1, 3, 5 г/дм³ и pH 2, 5, 7, 9 через образцы пород (минеральный состав пород был определен рентгенометрическим методом до и после проведения экспериментов). Это дало возможность выявить новые минеральные образования в изучаемой породе.

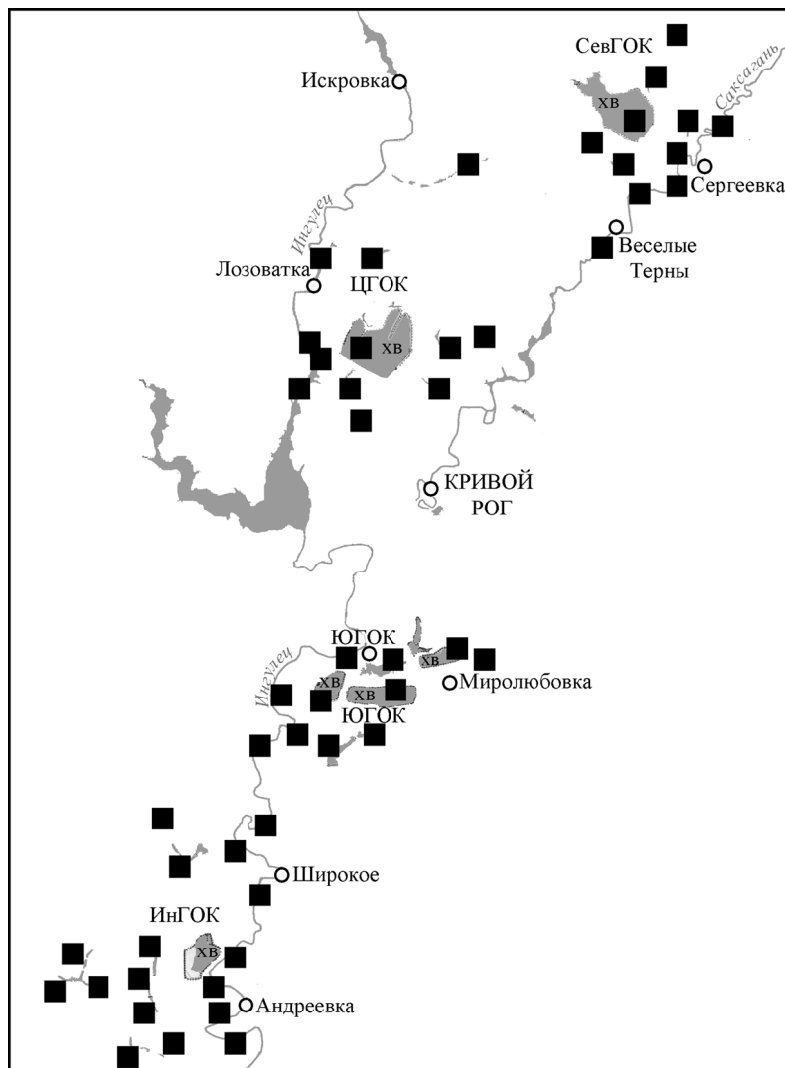


Рис. 1. Картограмма Криворожского железорудного бассейна
Условные обозначения:

- – пункт наблюдения; хв – хвостохранилище; СевГОК – Северный горно-обогатительный комбинат; ЦГОК – Центральный горно-обогатительный комбинат; ЮГОК – Южный горно-обогатительный комбинат; ИнГОК – Ингулецкий горно-обогатительный комбинат

Таблица 1

Количество пунктов наблюдений по водным объектам на территории Криворожского железорудного бассейна

Горно-обогатительный комбинат	Водные объекты		
	Хвостохранилища	Пруды	Реки (название/количество пунктов наблюдений)
Северный	1	6	Саксагань / 6
Центральный	1	6	Ингулец / 5
Южный	3	8	Ингулец / 4
Ингулецкий	1	16	Ингулец / 8

Теоретический анализ и термодинамические расчеты процессов гидролиза силикатов и алюмосиликатов выполнены по методикам В. П. Зверева [6] и С. Л. Шварцева [7], осаждения и растворения карбонатов в воде – по методике Л. Н. Горева [8].

Результаты и обсуждение

Отработка железорудных месторождений в Кривбассе ведется карьерами и шахтами, которые оставляют огромные пустоты (карьеры), насыпи – отвалы (у шахт), появляются складываемые руды – огромные хвостохранилища. В хвостохранилищах складываются те руды, процентное содержание элементов в которых ниже промышленного, необходимого по технологии, или складываются отработанные руды (хвосты) после изъятия полезных компонентов. Здесь складываются иногда огромные количества (до сотен и десятков тысяч тонн) такой руды, которые занимают площади до десятков и сотен квадратных метров. Все те процессы, которые происходят с рудами в зоне гипергенеза, не прекращаются, а усиливаются в хвостохранилищах и отвалах шахт благодаря возрастающему механическому влиянию и доступу кислорода и воды. Происходит специфическое минералообразование, связанное с технологическими растворами.

Железные руды, которые добываются в Криворожском бассейне по массовому содержанию железа делятся на естественно богатые и бедные (которые нуждаются в обогащении) руды. Богатыми являются руды с содержанием железа от 46 до 70 %.

Бедные железные руды, которые нуждаются в обогащении, разделяют на легко- и тяжелообогащаемые в зависимости от минерального состава и других особенностей.

Содержание железа в рудах, которые добываются в Криворожском бассейне, изменяется от 41 (Ингулецкое месторождение) до 31 % (Большая Глееватка, ЦГОК). Содержание железа в концентрате, который производится на обогатительных фабриках, достигает 68,0 % [4].

Технология обогащения железных руд предусматривает строительство и эксплуатацию гидротехнических объектов: хвостохранилищ с аварийными емкостями, дренажных сооружений вокруг хвостохранилищ и в дамбе, прудов оборотного водоснабжения, прудов-накопителей шахтных вод и пр.

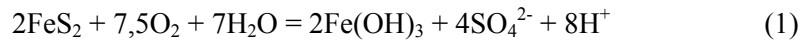
Технологическая схема обогащения магнетитовых кварцитов включает: дробление в 3–4 стадии, 3 стадии измельчения и 4–5 стадий магнитной сепарации. Отходы обогащения (пульпа) складываются в хвостохранилищах. Кроме основного назначения – складирование отходов добычи и обогащения железной руды, – хвостохранилища выполняют важную водорегулирующую функцию, поскольку являются важнейшим составным звеном системы оборотного водоснабжения комбинатов.

Анализ гипергенных процессов в водоемах хвостохранилищ выполнен по изученному минеральному составу текучих и лежалых хвостов обогащения Северного ГОКа (В. Д. Евтехов, И. А. Федорова [2]).

Складирование текучих хвостов продолжается все время с начала разработки железорудного месторождения. В окислительных условиях, которые существуют на поверхности земли, в текучих хвостах происходят специфические геохимические процессы: окисление сульфидных минералов, гидролиз

силикатов и алюмосиликатов, в результате которых, со временем, происходят изменения минерального состава и текучие хвосты переходят в стадию лежащих хвостов. Некоторые минералы хвостов обогащения в хвостохранилище превращаются во вторичные минералы: пирит и пирротин – в ярозит вследствие окисления, хлорит и альбит – в монтмориллонит вследствие гидролиза.

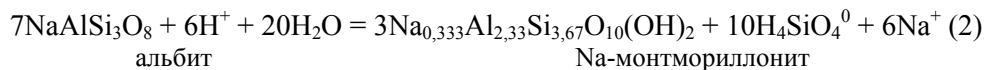
В хвостах основным окислителем является молекулярный кислород. Проникая в породу из атмосферы, он вступает во взаимодействие с ней и окисляет некоторые минералы, а именно пирит и пирротин. Кроме него, окислителями являются также Fe^{3+} и S^{6+} . Процесс химического выветривания пирита выглядит следующим образом [6]:



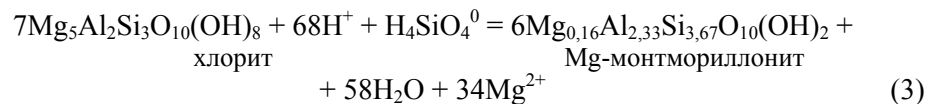
$$\Delta G_{\text{реак}}^0 = -1292,85 \text{ кДж/моль.}$$

На первых этапах заполнения хвостохранилища СевГОКа наблюдаются низкие значения водородного показателя (рН), наиболее низкое значение зафиксировано в 1982 г. (рН = 5), что обеспечивалось окислением пирита и пирротина. После 1983 г. рН воды в водоеме хвостохранилища стало выше 7,0 и ниже этого значения не опускается. Это объясняется довольно незначительным содержанием пирита и пирротина (0,23 объемн. %) в общем объеме хвостов обогащения. Но реакции окисления являются источником поступления в воду H^+ , что обуславливает развитие в хвостах обогащения других процессов, в частности гидролиза силикатов и алюмосиликатов.

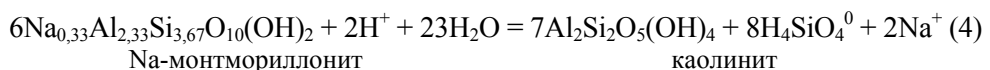
Согласно выявленным минералам в текучих и лежащих хвостах обогащения железных руд СевГОКа рассмотрены следующие реакции гидролиза [6]:



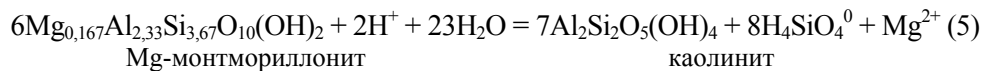
$$\Delta G_{\text{реак}}^0 = -58,98 \text{ кДж/моль;}$$



$$\Delta G_{\text{реак}}^0 = -2693,11 \text{ кДж/моль;}$$



$$\Delta G_{\text{реак}}^0 = 96,97 \text{ кДж/моль;}$$



$$\Delta G_{\text{реак}}^0 = 104,57 \text{ кДж/моль.}$$

Реакции по уравнениям (2) и (3) происходят самопроизвольно при отрицательном значении свободной энергии, реакции по уравнениям (4) и (5) (переход к каолиниту) самопроизвольно происходить не могут, они нуждаются в химической энергии.

Чаще всего для изучения процессов гидролиза применяется метод плоских диаграмм в двумерных системах содержания макрокомпонентов [7].

В результате водной и воздушной геохимической миграции вблизи хвостохранилищ, карьеров и других объектов горно-обогатительных комбинатов формируются ареолы загрязнения. Расчеты показывают, что в воде техногенных и природно-техногенных водных объектов Криворожской железорудной зоны происходят процессы гидролиза силикатов и алюмосиликатов по уравнениям (3) и (5) (рис. 2).

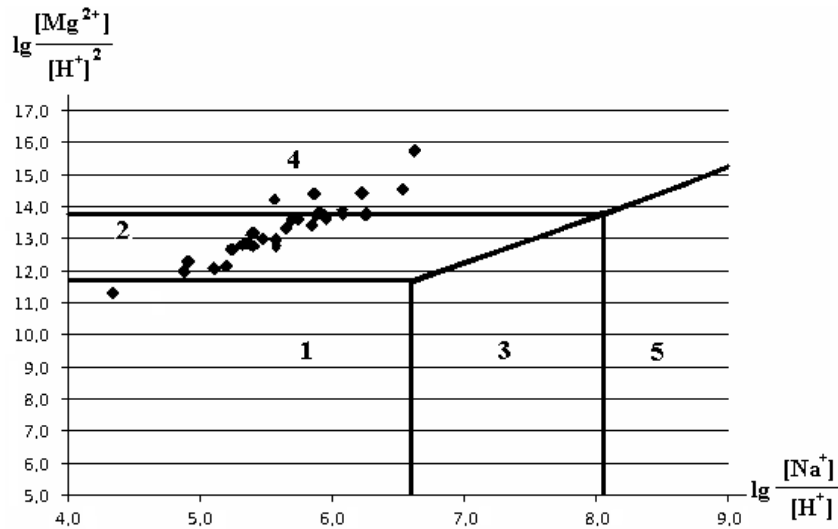


Рис. 2. Система $\text{HCl-H}_2\text{O-Na}_2\text{O-MgO-SiO}_2$ при $t = 25^\circ\text{C}$ и $\lg[\text{H}_4\text{SiO}_4] = -3,75$ с нанесенными данными по химическому составу воды пруда в балке Мотина (СевГОК) (1978–2010 гг.): номерами указаны поля устойчивости минералов: 1 – каолинит; 2 – Mg-монтмориллонит; 3 – Na-монтмориллонит; 4 – хлорит; 5 – альбит

В воде всех водных объектов на данной территории устанавливаются равновесия либо с каолинитом (поле 1), либо с Mg-монтмориллонитом (поле 2), либо с хлоритом (поле 4), равновесия с Na-монтмориллонитом и альбитом никогда не устанавливаются. Выявленная закономерность позволяет перейти к изучению процессов гидролиза силикатов и алюмосиликатов во времени (рис. 3).

Установлено, что гидролиз алюмосиликатов в воде водных объектов происходит следующим образом:

– в хвостохранилищах СевГОКа, ЦГОКа, ЮГОКа воды водоемов находятся в равновесии с монтмориллонитом, т.е. здесь активно продолжается процесс гидролиза хлорита;

– в большинстве прудов в воде устанавливается равновесие с Mg-монтмориллонитом, при поступлении химической энергии (в результате минерализации органических веществ) гидролиз продолжается и равновесие устанавливается с каолинитом. В воду прудов в значительных количествах поступают ионы Mg^{2+} ;

– в р. Саксагань с 2008 г. в большинстве пунктов наблюдения устанавливаются равновесия речной воды с каолинитом, которые не являются харак-

терными для речных вод. На верхнем участке р. Ингулец (выше Карачуновского водохранилища) с 2009 г. активизируется гидролиз Mg-монтмориллонита, иногда до каолинита; на нижнем участке р. Ингулец установились типичные равновесия с Mg-монтмориллонитом.

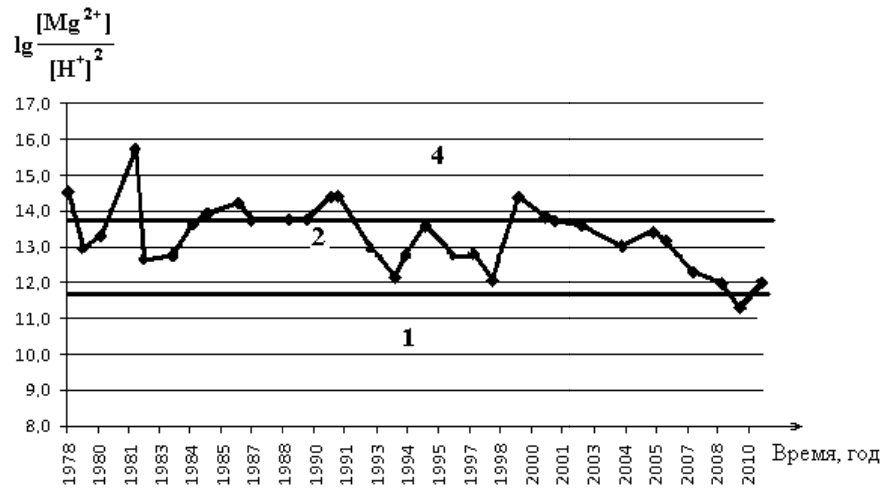
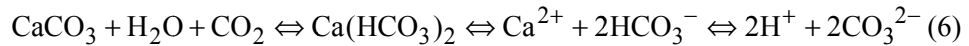


Рис. 3. График изменений во времени системы HCl-H₂O-Na₂O-MgO-SiO₂ при t = 25 °С и lg[H₄SiO₄]= -3,75 с нанесенными данными анализов проб воды из пруда балки Мотина (СевГОК) за время наблюдений, 1978–2010 гг.

Важным процессом, который сопровождает гидролиз, является нейтрализация щелочности (иона OH⁻), которая образовалась при этом, что в свою очередь влияет на равновесия в карбонатной системе.

Если в природной воде находятся CO_{2(свободный)}, ионы Ca²⁺ и HCO₃⁻, а в твердой фазе – CaCO₃, то между ними устанавливается равновесие, которое описывается уравнением [8]



Преимущество прямой реакции (вправо) свидетельствует о растворении карбоната кальция под влиянием CO₂, обратной (влево) – о накоплении карбоната за счет разложения бикарбоната кальция.

Оценка равновесий в карбонатно-кальциевой системе выполнена с использованием индекса стабильности воды (I) [8], который определен аналитическим и графическим методами. Стабильность воды по индексу стабильности определяется по формуле

$$I = \text{pH}_{\text{вих}} - \text{pH}_{\text{нас}}, \quad (7)$$

где pH_{вих} определяется при выполнении химического анализа воды известными методами (исходная, фактическая величина); pH_{нас} рассчитывается по известным данным о температуре воды, концентрации ионов кальция, щелочности и общему содержанию солей (минерализацией) в воде по формуле

$$\text{pH}_{\text{нас}} = \text{pK}_{\text{HCO}_3^-} - \text{pL}_{\text{CaCO}_3} - \lg 10^3 [\text{Ca}^{2+}] - \lg [2800\text{Щ}] + \frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{2\mu}} + 8,07, \quad (8)$$

где $pK_{\text{HCO}_3^-}$ – отрицательный логарифм константы второй степени диссоциации угольной кислоты; pL_{CaCO_3} – отрицательный логарифм произведения растворимости CaCO_3 ; $[\text{Ca}^{2+}]$ – весовая концентрация ионов кальция; $\text{Щ} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]$ – щелочность воды; μ – ионная сила воды.

Если $I = 0$, то вода будет стабильной, при отрицательном значении – агрессивной, склонной к растворению CaCO_3 , при положительном – к отложению CaCO_3 .

Результаты расчетов индекса стабильности можно представить в виде графиков, если гидрохимические наблюдения проводились довольно продолжительное время (рис. 4).

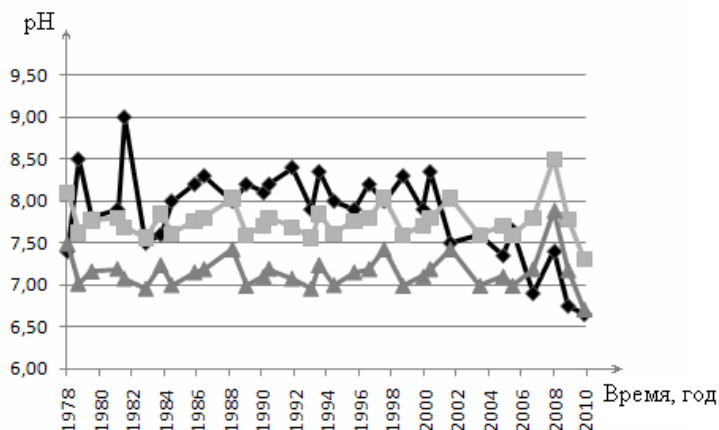


Рис. 4. График изменения во времени pH в воде пруда балки Мотина, СевГОК, с фактическим $pH_{\text{исх}}$ и с расчетными значениями $pH_{\text{нас}}$ при температуре воды 0 и 25 °С: —●— $pH_{\text{исх}}$ —■— $pH_{\text{нас.0}^\circ\text{C}}$ —▲— $pH_{\text{нас.25}^\circ\text{C}}$

Проанализированы состояния карбонатной системы водных объектов Криворожского бассейна и выявлено следующее:

- в воде водоемов хвостохранилищ, за исключением ИнГОКа, происходит осаждение карбоната кальция, в водоеме хвостохранилища ИнГОКа карбонатная система достигает равновесного состояния;
- в воде прудов происходит осаждение карбоната кальция, со временем этот процесс изменяется на равновесное состояние;
- в воде р. Саксагань и Ингулец карбонатно-кальциевая система склонна к осаждению (до 2000 г.), со временем система переходит в равновесное состояние, а в 2009, 2010 гг. отмечаются одиночные состояния растворения в воде р. Ингулец.

Выводы

1. На территории добычи и обогащения железных руд усиливаются процессы химического выветривания, которые происходят в хвостах обогащения в хвостохранилищах Кривбасса, а именно: пирит и пирротин превращаются в ярозит, хлорит – в монтмориллонит.

2. Окисление сульфидных минералов (пирита и пирротина) в хвостах обогащения является источником поступления водородных ионов в воду во-

доемов хвостохранилищ, что усиливает развитие процессов гидролиза силикатов и алюмосиликатов и нарушение равновесий в карбонатно-кальциевой системе.

3. Вследствие воздушной и водной миграции хвостов обогащения из хвостохранилищ характерным для всех водных объектов на данной территории является процесс гидролиза силикатов и алюмосиликатов, который приводит к поступлению в воду ионов магния, увеличению ее минерализации, жесткости, величины водородного показателя.

4. В результате процесса гидролиза нарушаются равновесия в карбонатно-кальциевой системе, что обуславливает развитие процесса осаждения карбоната кальция в большинстве водных объектов на территории Криворожского бассейна и изменение химического типа воды в них.

5. Химический состав воды водных объектов районов добычи и обогащения железных руд формируется самопроизвольно и достигает определенных равновесно-неравновесных состояний.

Список литературы

1. **Рудько, Г. И.** Економічна геологія родовищ залізистих кварцитів / Г. И. Рудько, О. В. Плотников та ін. – Київ : Академпрес, 2010. – 272 с.
2. **Яхонтова, Л. К.** Основы минералогии гипергенеза / Л. К. Яхонтова, В. П. Зверева. – Владивосток : Дальнаука, 2000. – 331 с.
3. **Коржинский, Д. С.** Теория метасоматической зональности / Д. С. Коржинский. – М. : Наука, 1982. – 423 с.
4. **Евтехов, В. Д.** Гранулометрический состав отходов обогащения Северного горно-обогатительного комбината Криворожского бассейна / В. Д. Евтехов, И. А. Федорова // Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету. – 2001. – № 1. – С. 38–46.
5. **Малахов, И. М.** Условия формирования донных осадков устьевых участков рек Днепровско-Бугского лимана в условиях антропогенной нагрузки / И. М. Малахов, Т. М. Алехина, В. В. Иваненко // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – № 2. – С. 69–78.
6. **Зверев, В. П.** Роль подземных вод в миграции химических элементов / В. П. Зверев. – М. : Недра, 1982. – 186 с.
7. **Шварцев, С. Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С. Л. Шварцев. – М. : Недра, 1988. – 366 с.
8. **Горев, Л. Н.** Мелиоративная гидрохимия / Л. Н. Горев, В. И. Пелешенко. – Киев : Высш. шк., 1984. – 256 с.

References

1. Rud'ko G. I., Plotnikov O. V. et al *Ekonomichna geologiya rodovishch zalizistikh kvartsitiv* [Economic geology of iron quartzite deposits]. Kiev: Akadempres, 2010, 272 p.
2. Yakhontova L. K., Zvereva V. P. *Osnovy mineralogii gipergeneza* [Basic mineralogy of hypergenesis]. Vladivostok: Dal'nauka, 2000, 331 p.
3. Korzhinskiy D. S. *Teoriya metasomaticheskoy zonal'nosti* [Theory of metasomatic zoning]. Moscow: Nauka, 1982, 423 p.
4. Evtekhov V. D., Fedorova I. A. *Geologo-mineralogichniy visnik Krivoriz'kogo tekhnichnogo universitetu* [Geological-mineralogical bulletin of Krivoy Rog Technical University]. 2001, no. 1, pp. 38–46.
5. Malakhov I. M., Alekhina T. M., Ivanenko V. V. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana* [Geology and minerals of the World ocean]. 2010, no. 2, pp. 69–78.
6. Zverev V. P. *Rol' podzemnykh vod v migratsii khimicheskikh elementov* [Importance of groundwaters in migration of chemical elements]. Moscow: Nedra, 1982, 186 p.

7. Shvartsev S. L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of hypergenesis zone]. Moscow: Nedra, 1988, 366 p.
8. Gorev L. N., Peleshenko V. I. *Meliorativnaya gidrokhimiya* [Land reclamation hydrochemistry]. Kiev: Vyssh. shk., 1984, 256 p.

Шерстюк Наталия Петровна

доктор географических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
заведующая кафедрой гидрометеорологии
и геоэкологии, Днепропетровский
национальный университет
имени Олеса Гончара
(Украина, г. Днепропетровск,
пр. К. Маркса, 36)

E-mail: sherstuknp@inbox.ru

Sherstuk Nataliya Petrovna

Doctor of geographical sciences, associate
professor, senior staff scientist, head
of sub-department of hydrometeorology
and geoecology, Dnepropetrovsk National
University named after Oles Gonchar
(36 K. Marksa avenue, Dnepropetrovsk,
Ukraine)

УДК 556.01

Шерстюк, Н. П.

Активизация гипергенных процессов в водных объектах районов добычи полезных ископаемых (на примере Криворожского железорудного бассейна) / Н. П. Шерстюк // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2014. – № 2 (6). – С. 108–119.