

УДК 550.42

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-116-123

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕОТЛОЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ РУДНЫХ ЖИЛ НА КАРБОНАТНОМ БАРЬЕРЕ ПРИ ПОВТОРНОЙ АКТИВИЗАЦИИ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Михаил Васильевич Борисов¹✉, Дмитрий Алексеевич Бычков²,
Юрий Всеволодович Шваров³, Татьяна Николаевна Лубкова⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, borisov@geol.msu.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, krok@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, yuri_shvarov@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, tanya_lubkova@mail.ru

Аннотация. Методами равновесно-динамического моделирования оценена возможность переотложения ранее сформированного вещества Pb-Zn жильных руд на карбонатном барьере при повторной активизации гидротермальной системы. Природным прототипом является рудопроявление Урсдон (Джимидонское рудное поле, Северная Осетия, Россия), локализованное в известняках оксфорда (J₃), а формирование полиметаллических жильных месторождений района происходило в предкалоновое время средней юры. Расчеты выполнены при использовании пакета программ HCh, включающего базу термодинамических данных Unitherm (система H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu, описанная 54 минералами, 78 частицами водного раствора). Установлено, что поздние низкотемпературные гидротермальные растворы могут обеспечить пиритизацию, окварцевание и формирование Pb-Zn оруденения в карбонатных породах. Отложение кварца и сульфидов происходит по трещинам и на фронте растворения карбонатных пород.

Ключевые слова: равновесно-динамическое моделирование, источники рудного вещества, полиметаллические жильные месторождения, карбонатный барьер

Для цитирования: Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В., Лубкова Т.Н. Термодинамические модели переотложения вещества свинцово-цинковых рудных жил на карбонатном барьере при повторной активизации гидротермальных процессов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 5. С. 116–123.

THERMODYNAMIC MODELS OF REDEPOSITION OF THE SUBSTANCE OF LEAD-ZINC ORE VEINS ON THE CARBONATE BARRIER DURING THE RE-ACTIVATION OF HYDROTHERMAL PROCESSES

Mikhail V. Borisov¹✉, Dmitry A. Bychkov², Yury V. Shvarov³, Tatyana N. Lubkova⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; borisov@geol.msu.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; krok@geol.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yuri_shvarov@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tanya_lubkova@mail.ru

Abstract. Equilibrium-dynamic modeling methods have been used to evaluate the possibility of redeposition of the previously formed vein Pb-Zn ore material on the carbonate barrier during the reactivation of the hydrothermal system. The natural prototype is the Ursdon ore occurrence (Dzhimidonskoe ore field, North Ossetia, Russia) localized in Oxfordian limestones (J₃), and the formation of polymetallic vein deposits in the area took place in the pre-Callovia time of the Middle Jurassic. The calculations were performed using the HCh software package, which includes the Unitherm thermodynamic database (H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu system, described by 54 minerals, 78 particles of an aqueous solution). It has been established that late low-temperature hydrothermal solutions can provide pyritization, silicification and the formation of Pb-Zn mineralization in carbonate rocks. The deposition of quartz and sulfides occurs along cracks and at the dissolution front of carbonate rocks.

Keywords: equilibrium-dynamic modeling, sources of ore matter, polymetallic vein deposits, carbonate barrier

For citation: Borisov M.V., Bychkov D.A., Shvarov Yu.V., Lubkova T.N. Thermodynamic models of redeposition of the substance of lead-zinc ore veins on the carbonate barrier during the re-activation of hydrothermal processes. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 5: 116–123. (In Russ.).

Введение. При проведении в 2009–2010 гг. ОАО «Севосгеологоразведка» поисковых работ на поверхности Джимидонского рудного поля (Садонский горнорудный район, Северная Осетия, Россия) на

северных продолжениях рудных зон Джимидонского месторождения были выявлены полиметаллические зоны минерализации, залегающие среди верхнеюрских карбонатных формаций Скалистого хребта.

Подобный тип оруденения является совершенно новым для Горной Осетии. Тем более, что формирование всех жильных Pb-Zn месторождений района (В.Згид, Садон, Архон, Холст, Джими и др.) происходило в предкелловейское время (J_2) [Некрасов, 1980]. Можно предположить, что в позднеюрское или меловое время произошла повторная активизация гидротермальной системы. Активизация могла быть инициирована интенсивными тектоническими подвижками, которые затронули, как рудные жилы (J_2), так и карбонатные породы (J_3). На глубинах 3–4 км низкотемпературные минерализованные воды (100–150 °С) могли взаимодействовать с веществом ранее образованных рудных жил, что привело к формированию рудоносных гидротермальных растворов. Эти растворы по трещинным каналам достигали карбонатные породы и при реакции с ними формировали новый тип рудопроявлений. Примерами таких объектов являются рудопроявления Урсдон, Ефремовское и Кариухох, локализованные в карбонатных породах (J_3 ox) и пространственно, лежащие на продолжении рудоконтролирующих разломов рудных зон Бозанг и Цагарсар (Джимидонское месторождение), но на удалении нескольких километров.

Целью работы является исследование количественных равновесно-динамических моделей переотложения вещества полиметаллических жил на карбонатном барьере для реконструкции механизмов и условий формирования рудной минерализации.

Материалы и методы исследования. Непосредственным прототипом наших исследований явилось рудопоявление Урсдон, расположенное в правом борту р. Урсдон, в 500 м севернее и на 100 м выше одноименного села у подножия южного эскарпа г. Кариухох. Рудопоявление приурочено к пачке органогенно-обломочных известняков, залегающих над горизонтом конгломератов келловейского возраста (J_2cl). Оно представлено линейной зоной трещиноватых и ожелезненных с поверхности известняков (рис. 1). Фиксируются многочисленные плоскости скольжения в интенсивно раздробленных известняках. Первичные сульфиды в значительной мере выщелочены. По данным ОАО «Севостеологоразведка» содержания цинка по рудопоявлению достигают 1,0%, свинца — 0,2–0,5%.

На рудопоявлении нами были отобраны три пробы: одна на самом обнажении (УРС-1), две на удалении 5 и 15 м (УРС-2 и УРС-3). Содержания Ca, Si, Fe, S, Zn, Pb, Cu определены в истертых пробах рентгенофлуоресцентным анализом (Niton XL3t900S-He GOLDD; кафедра геохимии МГУ). Правильность контролировалась по серии отечественных и зарубежных стандартных образцов (ГСО 793-76, 1230-77, 2029-79; NIST RCRA, GBM 307-14, 308-3, 309-1, 906-10, 911-16, 915-7). Расхождение между измеренными и аттестованными значениями содержания рудных элементов не превышает 5–10%.



Рис. 1. Коренные выходы окварцованных и пиритизированных известняков (J_3) на рудопоявлении Урсдон с проявлением сильной лимонитизации за счет окисления пирита

Равновесно-динамическое моделирование переотложения вещества рудных тел на карбонатном барьере выполнено при использовании пакета программ HCh [Шваров, 2008], включающего базу термодинамических данных Unitherm (система H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu, описанная 54 минералами, 78 частицами водного раствора).

Результаты исследований и их обсуждение. Расчеты проведены для множества вариантов двух типов моделей. Модель 1 типа — взаимодействие рудоносного раствора только с карбонатной породой. Модель 2 типа — комбинация отложения вещества из рудоносного раствора в подводившем канале и при его реакции с кальцитом. В вариантах меняются число последовательных проточных реакторов, состав руды и исходного гидротермального раствора, отношения руда/раствор и порода/раствор, температура и давление.

На рис. 2 показана простая схема расчетов для **модели 1 типа**: нулевой реактор — исходный безрудный раствор вступает в реакцию с веществом рудной жилы при T_0 и P_0 ; первый реактор — рудоносный раствор из нулевого реактора реагирует с кальцитом при T_1 и P_1 . В каждом реакторе достигается равновесное состояние.

Состав руды в нулевом реакторе: кварц (Qtz), пирит (Py), сфалерит (ZnS), галенит (PbS), халькопирит (ChPy) в различных соотношениях. Температура и давление в реакторах могут быть одинаковыми или снижаться в первом реакторе. Исходный рас-

Таблица

Содержания ряда элементов на рудопроявлении Урсдон, масс. %

Проба	Ca	Fe	Si	S	Zn	Pb	Cu
УРС-1	16,1	5,89	16,6	9,52	0,0345	0,027	0,0019
УРС-2	38,8	0,27	1,2	0,21	0,0063	0,0016	0,0013
УРС-3	39,3	0,18	0,9	0,18	0,0018	0,0009	0,0023

твор состава 1 т NaCl, 0,5 т H₂CO₃, 1 кг H₂O принят в большей части расчетов. Он аналогичен составу безрудного раствора из моделей рудообразования, которые описывают формирование полиметаллических месторождений района (обоснования приводились ранее [Борисов и др., 2006, 2022; Borisov et al., 2019 и др.]). Через реакторы проходит до $N=20$ волн растворов. Каждая следующая порция раствора реагирует со всем веществом, образованном на предыдущем шаге.

Рассмотрим часть полученных результатов.

Вариант с одинаковыми T и P в реакторах: $T=100^\circ\text{C}$ и $P=100$ МПа. Состав руды в данном расчете (масс.%): 74, 95 Qtz, 20 Py, 4 ZnS, 1 PbS, 0,05 ChPy. Исходный раствор после реакции с рудой (100 г) в нулевом реакторе становится рудоносным. Его характеристики: $\text{pH}=3,1$; $E_h=-0,1$ В; суммарные концентрации $\text{Fe}=8,7 \cdot 10^{-7}$ т, $\text{Zn}=5,7 \cdot 10^{-5}$ т, $\text{Pb}=4 \cdot 10^{-6}$ т, $\text{Si}=1,1 \cdot 10^{-3}$ т, $\text{Cu}=1,3 \cdot 10^{-7}$ т, $\text{S(II)}=6,2 \cdot 10^{-5}$ т (здесь и далее «т» соответствует моляльной концентрации, т.е. моль/1000 г H₂O). При взаимодействии такого раствора с кальцитом (100 г) повышается pH до 5, E_h снижается до $-0,24$ В, концентрации компонентов уменьшаются до $\text{Fe}=8,4 \cdot 10^{-7}$ т, $\text{Zn}=7,1 \cdot 10^{-7}$ т, $\text{Pb}=4,8 \cdot 10^{-8}$ т, $\text{Cu}=2,2 \cdot 10^{-8}$ т, $\text{S(II)}=1,5 \cdot 10^{-6}$ т (концентрация Si уменьшается незначительно). Видно, что реакция с кальцитом приводит к отложению (суммарно из 21 порции раствора) сфалерита до $1 \cdot 10^{-3}$ моля, галенита до $8 \cdot 10^{-5}$ моля, сульфидов меди (халькопирит, борнит — Brn, халькозин — Chl) до $1 \cdot 10^{-6}$ моля, кварца до $1,5 \cdot 10^{-5}$ моля. Пирит не образуется.

Положительным результатом данного варианта является формирование сфалерит-галенитовой минерализации. Однако кварца отлагается значительно меньше сульфидов, а пирита вообще нет. Для рудопроявления Урсдон характерна высокая степень окварцевания известняка и пиритизация, которая отчетливо проявляется на обнажении развитием зоны лимонитизации (рис. 1, таблица). Таким образом, рассмотренный вариант модели только частично соответствует данным по реальному объекту. Следует отметить, что данные таблицы не могут дать полную характеристику рудопроявления. В пределах ярко выраженной зоны ожелезнения известняков взята всего одна проба — УРС-1. Однако отчетливо видно, что в пробе УРС-1 по сравнению с УРС-2 и УРС-3 более чем на порядок выше содержания Fe, Si, Zn, Pb.

Понизим температуру до 90°C в реакторе с карбонатом (остальные параметры остаются без изменения). Состав и характеристики рудоносного раствора соответствуют варианту, рассмотренному выше. Отлагаются практически аналогичные количества сфалерита, галенита и сульфидов меди, но кварца стало на два порядка больше (до $4 \cdot 10^{-3}$ моля). Окварцевание усилилось, но пиритизация не происходит. Результаты, полученные в модели с двумя реакторами при прохождении 21 порции раствора, можно рассматривать только как предварительные или качественные. Они показывают, что при реакции рудоносного раствора с кальцитом первыми отлагаются сульфиды цветных металлов. Можно предположить, что для отложения пирита необходимо изменить состав и массу руды в нулевом реакторе, а также увеличить время взаимодействия (N).

Модифицируем модель: карбонатная порода представлена тремя последовательными проточными реакторами (рис. 3) с возрастающей массой кальцита (20, 50, 100 г). Расчеты с возрастающей массой породы в проточных реакторах ранее применялись нами для моделирования метасоматической зональности вмещающих оруденение пород [Борисов, 2000].

Состав руды в данной модели (масс.%): 77,499 Qtz, 20 Py, 2 ZnS, 0,5 PbS, 0,001 ChPy. В нулевом реакторе 5 г руды взаимодействует с исходным хлоридно-углекислым раствором. Расчеты проведены для двух вариантов: 1) температура во всех реакторах постоянная (100°C); 2) температура в нулевом реакторе 100°C , а в трех реакторах с карбонатом снижается до 90°C . Через все реакторы проходит 51 порция раствора ($N=50$ и счет идет от 0). Значения N можно рассматривать как относительную шкалу времени.

При постоянной температуре во всех реакторах (левая часть рис. 4) хорошо видно, что в первом реакторе содержание пирита быстро растет по мере растворения и переотложения в следующий реактор сульфидов цинка и свинца. Этот процесс начинается при полном выщелачивании сфалерита и галенита из исходной руды. После прохождения 25–30 порций раствора, в первом реакторе устойчива ассоциация $\text{Py}+\text{Qtz}$ ($1 \cdot 10^{-5}$ и $3 \cdot 10^{-6}$ моля), во втором — $\text{ZnS}+\text{PbS}+\text{Qtz}+\text{Py}$, в третьем реакторе — $\text{Ca}+\text{ZnS}+\text{PbS}+\text{Qtz}$. При дальнейшем развитии процесса (при $N>35$) область пиритизации распространяется на второй реактор и частично на третий. Необходимо отметить, что пирит также будет отлагаться в реакторах при реакции с кальцитом, но в варианте полного отсутствия или очень маленького количества сульфидов Zn, Pb и Cu в исходной руде (установлено в отдельной серии расчетов).

При снижении температуры в известняке (правая часть рис. 4, $N=30-35$) в первом реакторе ассоциация минералов, по сравнению с изотермическим вариантом, осталась аналогичной, но при значительном преобладании кварца над пиритом:

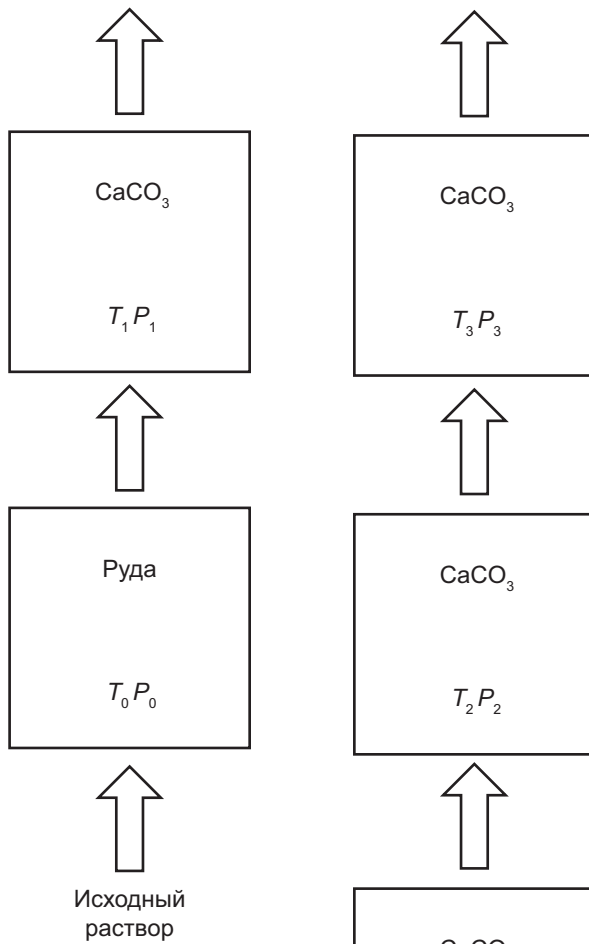


Рис. 2. Двухреакторная схема расчетов в модели 1 типа

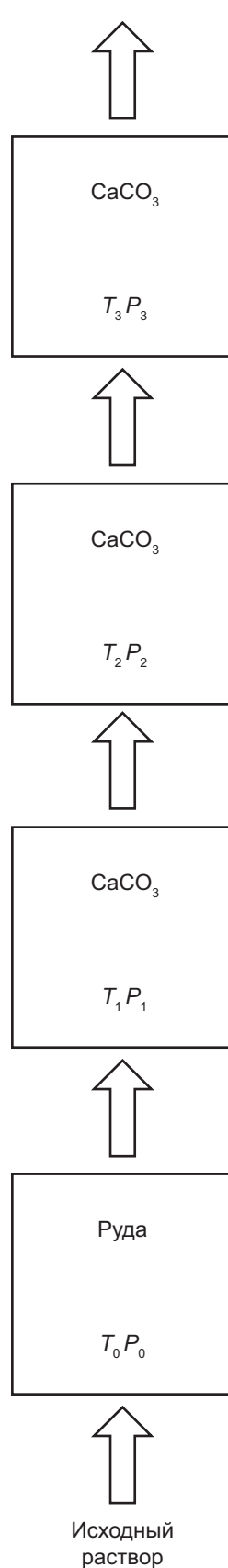


Рис. 3. Многореакторная схема расчетов в модели 1 типа

Qtz+Py ($7 \cdot 10^{-3}$ и $3 \cdot 10^{-5}$ моля). Во втором и третьем реакторах значимых отличий нет.

Главным итогом расчетов по рассмотренной модели является установление возможности отложения кварца, пирита и сульфидов Zn, Pb, Cu при реакции с карбонатными породами в изотермических условиях. Небольшое снижение температуры в карбонатной породе усиливает ее окварцевание и пиритизацию.

Расширить область отложения минералов можно в модели, в которой дополнительно учитывается минералообразование в подводящих рудоносные растворы трещинах в карбонатных породах. На рис. 5 показана многореакторная схема расчетов для модели 2 типа: 0 реактор — исходная руда (T_0, P_0); 1–5 реакторы — «пустое» трещинное пространство в карбонатных породах, где при понижении температуры из рудоносного раствора формируется модельная жила (от T_1-P_1 до T_5-P_5); 1к–3к реакторы — кальцит в околотрещинном пространстве (массой 20, 50 и 100 г) с $T'-P'$ отвечающими аналогичным в реакторах 1–5. В модели последние три реактора представляют микротрещиноватое и пористое пространство в карбонатной породе рядом с основной жилой. Расчеты проводились для каждого уровня по температуре. На рис. 5 показаны в качестве примера только два уровня по температуре (T_2' и T_4'), где в трех проточных реакторах происходит взаимодействие раствора из трещинного канала с известняком.

Рассмотрим результаты расчетов по модели второго типа, когда температура при реакции с рудой составляет 150°C . В реакторах 1–5 происходит постепенное понижение T от 140 до 100°C (шаг 10°C). Кальцит реагирует с раствором из трещинного канала при постоянной температуре (реакторы 1к–3к).

Повышение температуры при реакции исходного раствора с рудой (в отличие от рассмотренных выше вариантов) приводит к росту суммарных концентраций компонентов: $\text{Fe} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\text{Zn} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $\text{Pb} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $\text{Si} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\text{Cu} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\text{S(II)} = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ($\text{pH} = 3,3$; $\text{Eh} = -0,13 \text{ В}$). Отложение вещества в трещинах описано нами слоевым механизмом [Борисов, 2000 и др.], когда из каждой порции рудоносного раствора из нулевого реактора отлагается отдельный слой минералов, а равновесный с ними раствор перетекает в следующий реактор с понижением температуры. Этот же раствор из трещинного канала в изотермических условиях реагирует с кальцитом в системе из трех проточных реакторов. При этом взаимодействии каждая следующая порция раствора полностью перерабатывает вещество, сформированное на предыдущем шаге. Такой механизм взаимодействия было предложено называть реакционным [Борисов, 2000]. Таким образом, в модели второго типа сочетаются слоевой и реакционный механизмы рудообразования. Часть результатов расчетов (при $N = 10$) по одному из вариантов модели 2 типа показаны на рис. 6.

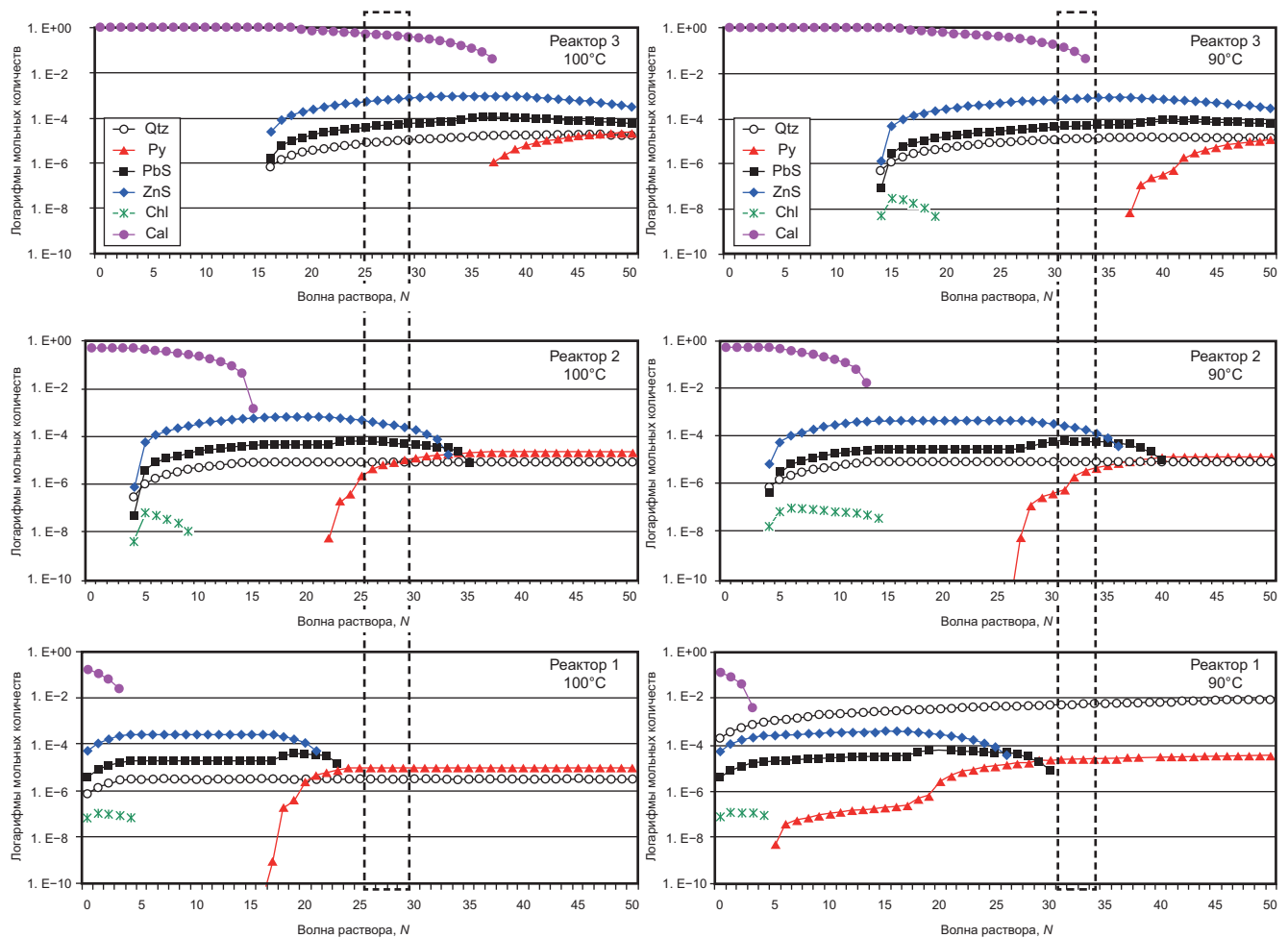


Рис. 4. Результаты расчетов по модели 1 типа (три последовательных реактора с кальцитом). В левой части — вариант с постоянной температурой во всех реакторах (100°C). В правой части — вариант с понижением температуры до 90°C в карбонатной породе. Пунктиром помечен интервал по волнам рудоносного раствора (N) со сменой минеральных ассоциаций по реакторам

По данным рис. 6 необходимы пояснения. Слева от пунктирных линий показаны минералы, которые отлагаются в модельной жиле при понижении температуры, но это только один слой, образованный при $N=10$. Кварц и сульфиды отлагаются и на всех предшествующих волнах раствора (от 0 до 9), т.е. суммарное количество новообразований на порядок выше, чем показано на рис. 6. Так например, кварца при 140°C суммарно отлагается $3,7 \cdot 10^{-3}$ моля, а в одном слое только $3,4 \cdot 10^{-4}$ моля. Аналогично и с пиритом: суммарно — $4 \cdot 10^{-6}$ моля, а в одном слое — $3,7 \cdot 10^{-7}$ моля. При этой температуре отлагаются сфалерит (до $3,3 \cdot 10^{-4}$ моля) и галенит (до $4,3 \cdot 10^{-5}$ моля). С понижением температуры (от 140 до 100°C на рис. 6, А, Б; от 140 до 130°C на рис. 6, В, Г) количество отложенного вещества снижается, поскольку концентрации компонентов в рудоносном растворе падают. Формируется обычная кварц-полиметаллическая жила.

Справа от пунктирных линий показаны минералы, которые образуются при реакции с кальцитом (реакторы 1к-3к на рис. 5). Кальцит на рис. 6 не показан. На 11 ($N=10$) волне растворов из трещинного канала он полностью растворился в реакторе

1к (ближнем к пунктирной линии), частично растворился в реакторе 2к и очень мало — в реакторе 3к. Отложение кварца и сульфидов в этих реакторах неравномерное. Количество кварца по сравнению с жилой уменьшается на 2 порядка (до $5 \cdot 10^{-6}$ моля в реакторах 1к и 2к, рис. 6, А). На рис. 6, А, Б хорошо видно, что максимумы отложения сфалерита ($3,4 \cdot 10^{-4}$ моля), галенита ($2,4 \cdot 10^{-5}$ моля) и халькопирита ($1,9 \cdot 10^{-7}$ моля) реализуются в реакторе 2к, где кальцит растворился частично. Нужно отметить, что эти количества соизмеримы с суммарным отложением сульфидов в жиле на данном уровне по температуре. На рис. 6, В, Г показана ситуация при более высокой температуре взаимодействия раствора с кальцитом (130°C). В этом случае максимумы отложения сфалерита ($7,8 \cdot 10^{-4}$ моля) и галенита ($7,6 \cdot 10^{-5}$ моля) приходятся на реактор 1к, а халькозина — на реактор 2к. В последнем реакторе кварц и сульфиды не отлагаются. Пирит отлагается только при полном растворении кальцита, что хорошо видно на рис. 6, Б, Г ($2,2 \cdot 10^{-8}$ моля при 100°C и $1,4 \cdot 10^{-7}$ моля при 130°C).

Эффективность отложения пирита можно усилить, если уменьшить отношение руда/вода в нуле-

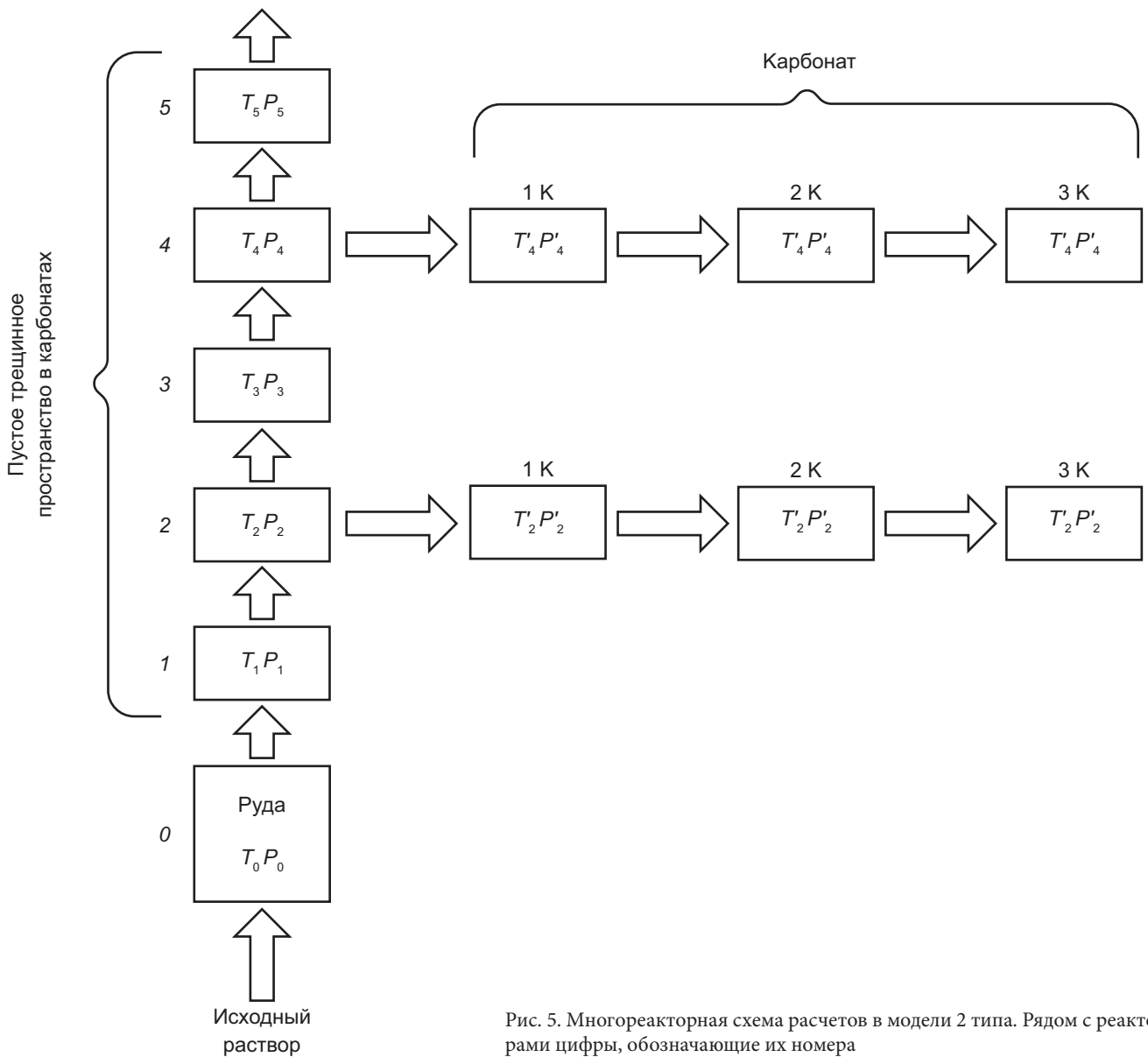


Рис. 5. Многореакторная схема расчетов в модели 2 типа. Рядом с реакторами цифры, обозначающие их номера

вом реакторе. Один из результатов такого расчета приведен на рис. 7.

В данном варианте расчета масса руды в нулевом реакторе понижена до 5 г (в предшествующих расчетах было 100 г). Состав руды (масс. %): 74,95 Qtz, 20 Py, 4 ZnS, 1 PbS, 0,05 ChPy. Поскольку количество сфалерита, галенита и халькопирита в исходной руде стало меньше, то их выщелачивание происходит быстрее. Так сфалерит полностью выщелачивается из руды при $N=11$, галенит — при $N=10$, халькопирит — при $N=7$. По сравнению с рассмотренным выше вариантом это приводит к отличиям в отложении данных минералов в жиле и в околожильном пространстве при реакции с кальцитом. В модельной жиле сфалерит и галенит отлагаются в 12 первых слоях, а сульфиды меди — в 8. Кварц и пирит отлагаются во всех слоях до $N=20$. Поэтому в одном слое при $N=20$ только два этих минерала показаны на рис. 7 левее пунктирной линии. В этом слое отлагается от $4,5 \cdot 10^{-6}$ до $1,1 \cdot 10^{-6}$ моля пирита. Суммарное содержание пирита в жиле во всех слоях значительно

выше: $4,4 \cdot 10^{-5}$ моля при 140°C и $1 \cdot 10^{-5}$ моля при 100°C . Это на порядок больше, чем было получено в варианте, представленном на рис. 6.

Что происходит в околожильном пространстве (три реактора правее пунктирной линии). В двух первых реакторах на фоне полного растворения кальцита формируется яркий максимум отложения пирита (до $9,2 \cdot 10^{-6}$ моля). Однако этот максимум практически равен суммарным содержаниям пирита в жиле. Максимумы отложения сфалерита ($4,2 \cdot 10^{-4}$ моля), галенита ($2,9 \cdot 10^{-5}$ моля) и халькопирита ($3,7 \cdot 10^{-7}$ моля) реализуются в среднем реакторе. В последнем реакторе кальцит растворяется частично и в нем отложение пирита не происходит, но кварц и рудные минералы накапливаются.

Таким образом, можно считать, что в моделях второго типа удастся получить минерализацию сопоставимую с той, которая наблюдается на рудопроявлении Урсдон. На обнажении (рис. 1) можно видеть плоскость контакта рудной жилы и карбонатных пород.

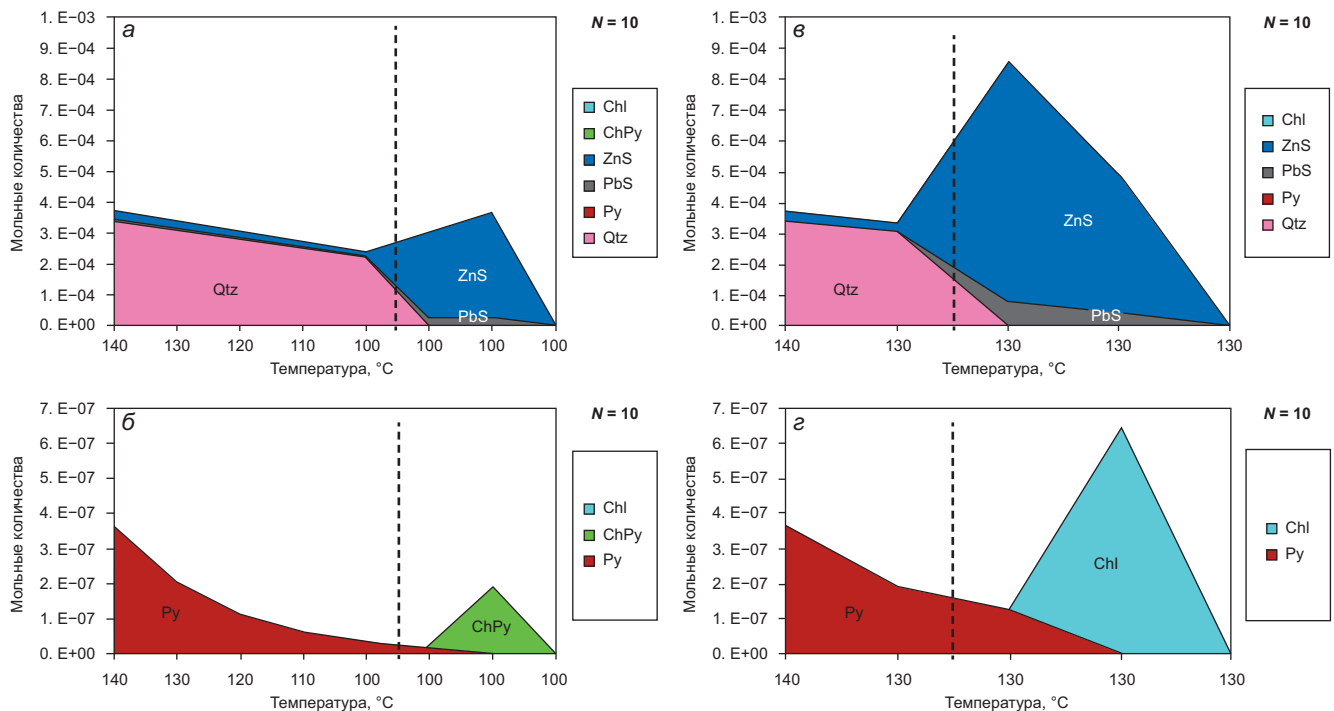


Рис. 6. Результаты расчетов по модели 2 типа. Отложение минералов в жилах и при реакции с кальцитом. *а-б*: 5 реакторов от 140 до 100 °С — трещинный канал, 3 реактора на уровне 100 °С — реакция с кальцитом (*а* — основные минералы, *б* — минералы в меньших количествах); *в-г*: 2 реактора от 140 до 130 °С — трещинный канал, 3 реактора при 130 °С — реакция с кальцитом (*в* — основные минералы, *г* — минералы в меньших количествах). Пунктирная линия разделяет область образования жилы (слева) и область реакции с карбонатной породой (справа)

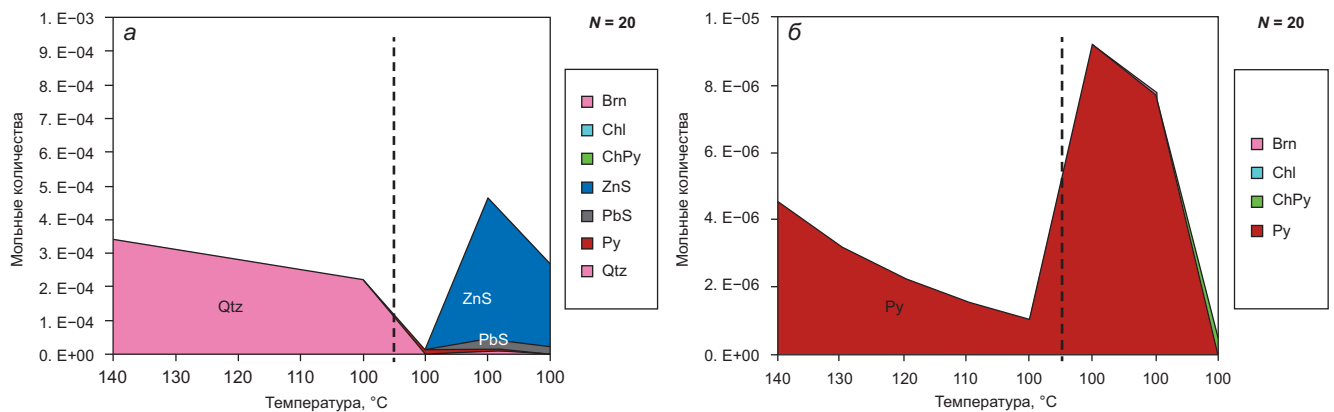


Рис. 7. Результаты расчетов по модели 2 типа при уменьшении отношения руда/вода. Отложение минералов в трещинных каналах и при реакции с кальцитом (прохождение 21 волн раствора). *а* — основные минералы, *б* — минералы в меньших количествах

Модели можно было бы усложнить. Например, представить зону мобилизации рудных компонентов не одним реактором, а несколькими с разным составом руды. Но это в реальности зависит от знания пути, по которому проходил раствор. А это установить невозможно. Можно было бы изменить температуру и шаг ее понижения в трещинном канале, но для этого нужно проводить дополнительные исследования, которые вряд ли принципиально повлияют на полученные результаты. Варианты с уменьшением давления и с изменениями состава безрудного раствора дополнительной информации не добавляют.

Заключение. В исследованных равновесно-динамических моделях установлено, что карбонатный

барьер способствует отложению кварца, пирита и сульфидов Zn, Pb, Cu даже в изотермических условиях. Источником компонентов таких руд могут являться ранее сформированные полиметаллические месторождения при повторной активизации гидротермальной системы. Сфалерит, галенит и сульфиды меди отлагаются на ранних этапах формирования рудопроявлений в карбонатных породах. Преимущественное и максимальное отложение пирита в этой системе происходит позже по раствороподводящим трещинам и в пространстве вмещающих карбонатных пород при полной мобилизации сульфидов Zn, Pb, Cu из источника этих компонентов. Небольшое снижение температуры рудоносного раствора в карбонатных породах приводит к значительному

росту отложения кварца. Процессы переотложения рудных компонентов на карбонатном барьере, исследованные в наших моделях, могут реализоваться не только на полиметаллических месторождениях, но и на других рудных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисов М.В. Геохимические и термодинамические модели жильного гидротермального рудообразования. М.: Научный мир, 2000. 360 с.

Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В. Геохимические структуры полиметаллических жил выполнения и параметры гидротермального рудообразования // Геохимия. 2006. № 11. С. 1218–1239.

Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В., Лубкова Т.Н. Процессы гидротермального жильного свинцово-цинкового рудообразования: геохимические данные и термодинамические модели // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 3. С. 26–36.

Некрасов Е.М. Структурные условия локализации жильных свинцово-цинковых месторождений. М.: Недра, 1980. 255 с.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках работы по госбюджетной теме «Развитие комплексных методов физической, прогнозно-поисковой и экологической геохимии» (номер ЦИТИС: 121061600048-7).

Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических процессов, предоставляемые Windows // Геохимия. 2008. № 8. С. 898–903.

Borison M. V., Bychkov D. A., Volkova M. M., Shvarov Yu. V. Role of water/rock interaction in the formation of ore-bearing solutions and deposition of hydrothermal ore, Sadon Mining District, North Caucasus Mountains, Russia // 16 International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16). 2019. Vol. 98. EDP Sciences (France). Article № 05003.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 25.10.2024