МІНЕРАЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ
MINERALOGICAL JOURNAL
(UKRAINE)

УДК 550.84

Н. О. Крюченко, Е. Я. Жовинський, Н. П. Іваненко

Моделювання утворення вторинного сольового ореолу над рудним тілом

Проведено чисельне моделювання утворення вторинного сольового ореолу розсіяння хімічних елементів і побудовано залежності параметрів сольового ореолу від параметрів рудного тіла. Отримані результати дають можливість широко використовувати сольові ореоли розсіяння у ході пошуків та локального прогнозування корисних копалин.

Вступ. У попередній статті [1] автори виклали стан проблеми математичного моделювання геохімічної міграції хімічних елементів, яка призводить до формування вторинних сольових ореолів розсіяння. Були зазначені недоліки математичного моделювання геохімічних полів на поточний час, а саме розгляд головним чином одновимірної моделі в однорідному середовищі. Але в цілому розрізи осадової товщі мають неоднорідну структуру. Крім того, одновимірність моделі не надає можливості визначити кількісно розміри ореолів, що обмежує практичне застосування отриманих результатів. Таким чином, була обґрунтована нагальна необхідність у постановці та чисельній реалізації більш точної математичної моделі фізико-хімічних процесів у неоднорідному середовищі у тривимірному вигляді, результати якої мали б не лише теоретичний, а й практичний інтерес.

Натепер розроблена та реалізована стаціонарна тривимірна вісесиметрична модель масопереносу в неоднорідному середовищі, яка враховує процеси дифузії та конвекції [1]:

$$u \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r}\right),$$

де C — концентрація в рідкій фазі, u — швидкість конвекції в напрямку вертикальної осі z, D — коефіцієнт дифузії, r — радіальна вісь. Процес дифузії полягає у переміщенні частинок у напрямку зменшення їх концентрації, а процес конвекції — у переміщенні частинок за рахунок руху рідини (наприклад, в результаті фільтрації). У зв'язку зі стаціонарною постановкою задачі процеси сорбції, іонного обміну та хімічних реакцій не враховувалися. Рівняння доповнено відповідними початковими та граничними умовами. Система реалізована для визначення умов формування вторинного ореолу над рудним об'єктом. Робимо припущення, що над рудним тілом певного діаметра знаходиться декілька шарів осадових порід з різними фізико-хімічними властивостями. Концентрація поза полем первинного ореолу вважається фоновою. На всіх інших границях заданий нульовий потік концентрації, тобто масообмін вважаємо відсутнім. Розв'язання системи проводимо за методом кінцевих різниць.

Мета чисельного моделювання — встановлення залежності параметрів вторинного сольового ореолу від параметрів рудного тіла.

Для вирішення цієї задачі була розроблена наступна методика: над рудним об'єктом будували проектний розріз осадової товщі (потужність шарів, коефіцієнт фільтрації, коефіцієнт дифузії осадових порід), а також задавали параметри рудного тіла: концентрацію рудного елемента на його поверхні та його діаметр. Для побудови залежності параметрів вторинного сольового ореолу від параметрів рудного тіла вводили поняття інтегрального вмісту елемента за площею рудного тіла та за площею вторинного сольового ореолу.

© Н. О. Крюченко, Е. Я. Жовинський, Н. П. Іваненко, 2008

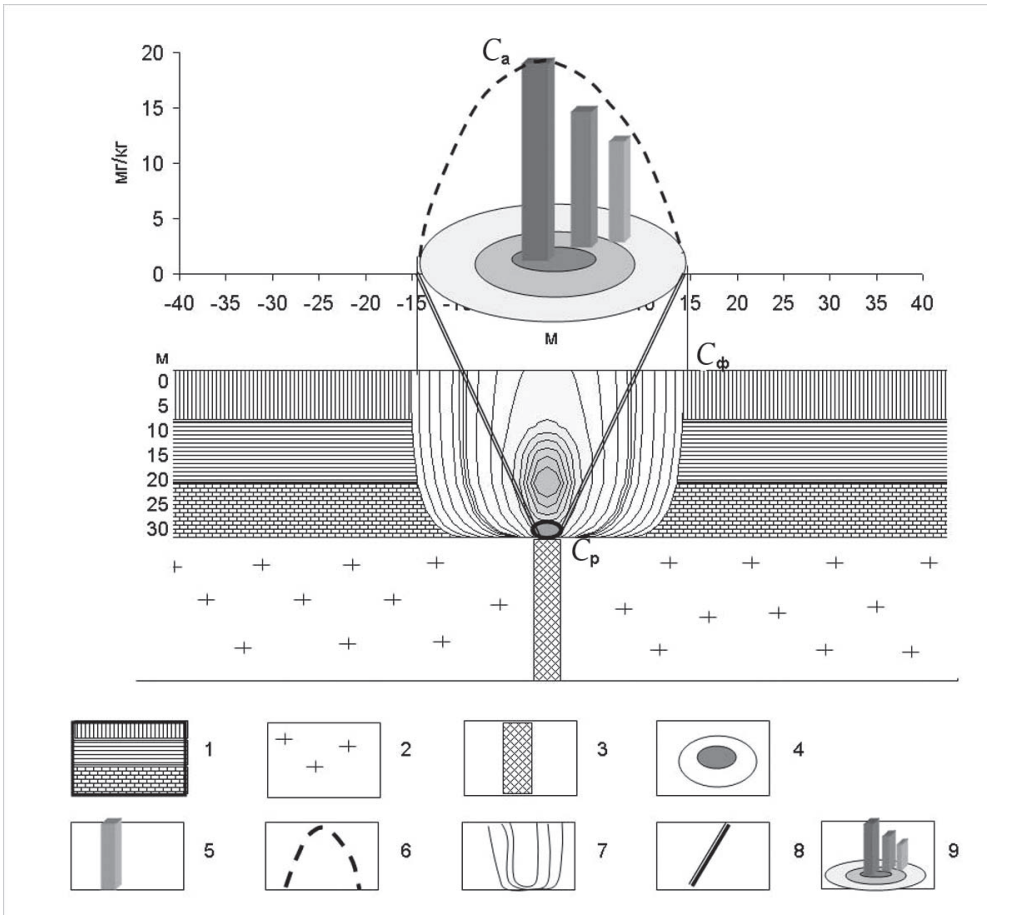


Рис. 1. Схема розрахунку інтегрального вмісту елемента у вторинному сольовому ореолі: *1* — осадові породи, *2* — кристалічні породи, *3* — рудне тіло, *4* — вторинний сольовий ореол, *5* — вміст елемента у вторинному сольовому ореолі на квадратний метр, *6* — графік вмісту елемента на одиниці площі поверхні вторинного сольового ореолу, *7* — ізолінії концентрації елемента в розрізі осадових порід, *8* — площадний зв'язок розподілу елемента на рудному тілі та у вторинному сольовому ореолі, *9* — інтегральний вміст елемента у вторинному сольовому ореолі. *Концентрація елемента, мг/кг*: $C_а$ — аномальна у вторинному сольовому ореолі, $C_ф$ — фонова у вторинному сольовому ореолі, $C_р$ — на поверхні рудного тіла

Проводячи моделювання змінювали діаметр рудного тіла та вміст рудного елемента на його поверхні й отримували розрахункові дані — максимальне значення вмісту елемента у сольовому ореолі, інтегральний вміст елемента за площею аномалії сольового ореолу та рудного тіла (рис. 1).

Проведено серію обчислювальних експериментів (чотири значення діаметра рудного тіла та чотири значення концентрації рудного елемента на його поверхні), тобто 16 обчислювальних експериментів (таблиця).

Для рудного тіла інтегральний вміст елемента за площею визначається за формулою:

$$CS_р = (C_р - C_Ф) \cdot \left(\pi \cdot d_р{}^2 / 4\right),$$

де $CS_р$ — інтегральний вміст елемента на поверхні рудного тіла (м^2·мг/кг), $d_р$ — діаметр рудного тіла (м), $C_р$ — концентрація на поверхні рудного тіла (мг/кг), $C_ф$ — фонова концентрація (середній вміст елемента в породах різного типу, мг/кг).

Для визначення інтегрального розрахункового вмісту елемента в сольовому ореолі $CS_а^m$ (м^2·мг/кг) визначають інтеграл по поверхні (під час проведення обчислювальних експериментів):

$$CS_а^m = \int_{S_а} \left(C_а(s) - C_Ф\right) \cdot ds,$$

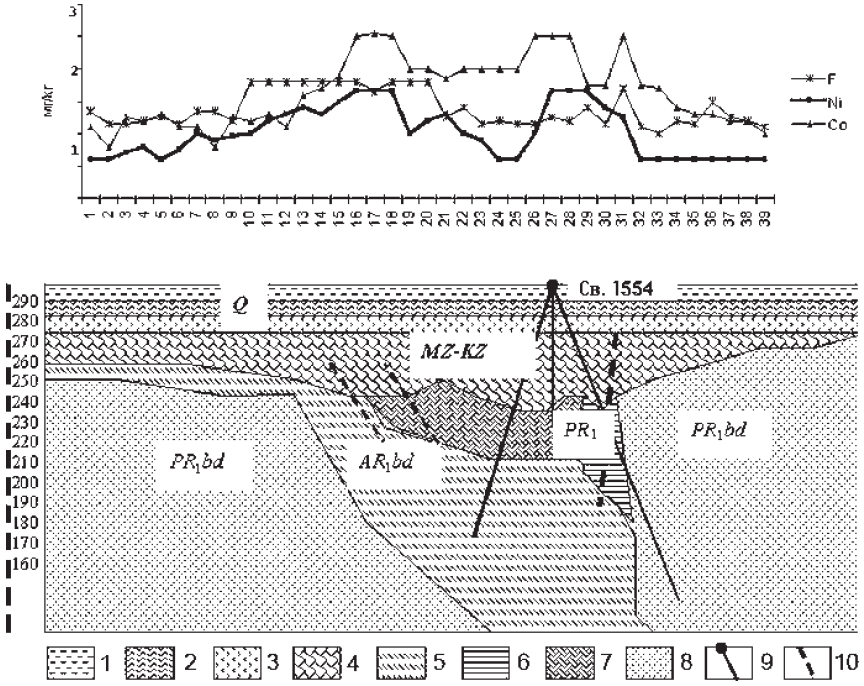


Рис. 2. Розподіл рухомих форм над розрізом Жданівської структури: *1* — супіщані осадові відклади, *2* — суглинки з прошарками пісків, *3* — глини з прошарками пісків, *4* — кора вивітрювання (глиниста), *5* — гнейси гранат-біотитові мігматизовані, *6* — піроксеніти амфіболізовані з малопотужними тілами горнблендитів, *7* — комплекс малих інтрузій сублужних основних та ультраосновних порід — перидотити (гарцбургіти) олівін-флогопітові, *8* — граніти і мігматити гранат-біотитові, *9* — свердловина, *10* — тектонічні порушення

де $S_а$ — площа аномалії вторинного сольового ореолу (м^2), $C_а(s)$ — концентрація елемента в точці *s* вторинного сольового ореолу (мг/кг).

За результатами проведених геохімічних робіт приблизне значення інтегрального вмісту елемента у вторинному сольовому ореолі визначається як сума за результатами проведеного геохімічного опробування:

$$CS_а^{ф} = \sum_{i=1}^{N} \left(C_а^{ф}(i) - C_ф\right) \cdot L_п \cdot L_m,$$

Результати експериментів

Номер експе-рименту	Інтегральний вміст елемента за площею аномалії сольового ореолу, м^2·мг/кг	Інтегральний вміст елемента за площею рудного тіла, м^2·мг/кг	Максимальне значення вмісту елемента у сольовому ореолі, мг/кг	Діаметр рудного тіла, м	Вміст елемента на поверхні рудного тіла, мг/кг
1	1562,0	784,1	1,4	1,0	1000,0
2	1671,1	3136,2	1,9	2,0	1000,0
3	9392,9	19601,5	5,2	5,0	1000,0
4	38423,3	78405,8	16,7	10,0	1000,0
5	2497,9	3924,1	2,3	1,0	5000,0
6	8355,4	15696,2	4,8	2,0	5000,0
7	46964,9	98101,5	21,2	5,0	5000,0
8	192118,5	392405,8	78,7	10,0	5000,0
9	4995,9	7849,1	3,4	1,0	10000,0
10	16710,9	31396,2	8,4	2,0	10000,0
11	93930,0	196226,5	41,2	5,0	10000,0
12	384237,4	784905,8	156,3	10,0	10000,0
13	7493,8	11774,1	4,5	1,0	15000,0
14	25066,4	47096,2	12,0	2,0	15000,0
15	140895,1	294351,5	61,2	5,0	15000,0
16	576356,4	1177405,8	233,8	10,0	15000,0

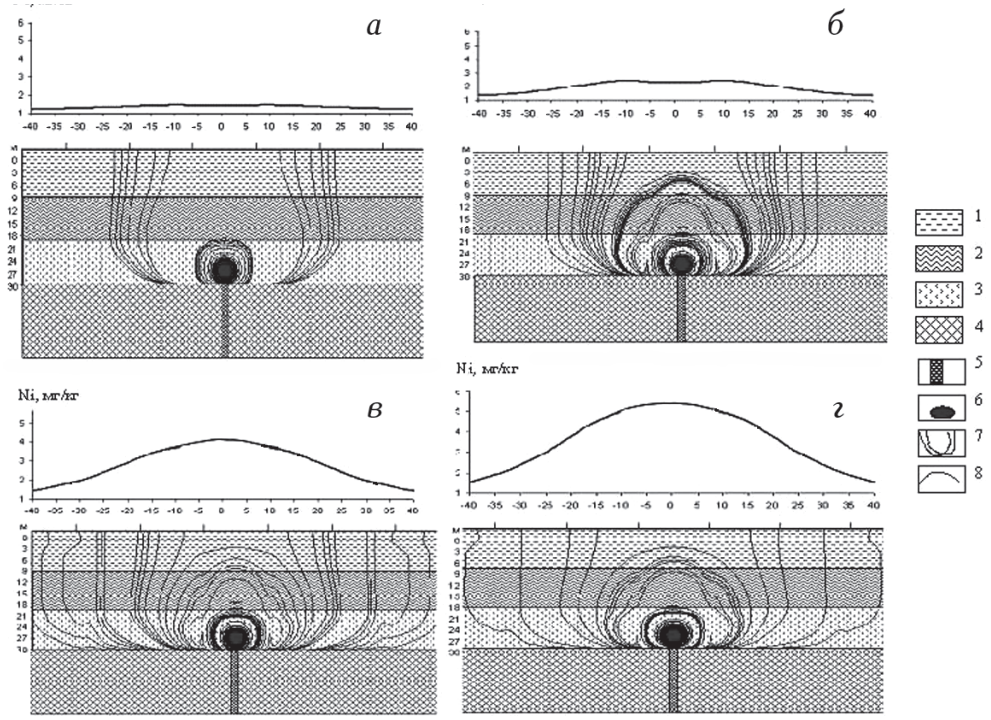


Рис. 3. Моделювання вторинного сольового ореолу на Жданівській ділянці (діаметр рудного тіла — 1,0 м) за змінної концентрації на поверхні рудного тіла, мг/кг: *а* — 1000,0; *б* — 5000,0; *в* — 10000,0; *г* — 15000,0. *1* — пісок середньозернистий, *2* — глини з прошарками пісків, *3* — глини строкаті, подекуди запісочені, *4* — кора вивітрювання, *5* — рудне тіло, *6* — максимальний вміст на поверхні рудного тіла, *7* — ізолінії вмісту Ni у вторинному ореолі, *8* — вміст рухомих форм Ni у вторинному сольовому ореолі (вісь абсцис — метри на поверхні, вісь ординат — вміст елемента, мг/кг)

де $CS_a^{ф}$ — інтегральний фактичний вміст елемента за площею аномалії сольового ореолу (м^2·мг/кг), N — кількість точок геохімічного опробування, $C_a^{ф}(i)$ — концентрація в точці i (мг/кг), $L_п$ — відстань між профілями (м), L_m — відстань між точками (м).

Моделювання на локальній ділянці. Випробування експериментальної моделі здійснювали на прикладі Жданівської ділянки, розташованої у центральній частині Вінницької обл. та приналежної до Дністровсько-Бузького (Подільського) грануліт-гнейсового мегаблоку.

Геологічна будова Жданівського мафіт-ультрамафітового масиву [2] досить складна і диференційована: центральна і західна частини представлені амфіболізованими перидотитами з поодинокими малопотужними тілами дунітів і піроксенітів, а північно-східна — діафторованими піроксенітами і апопіроксенітовими горнблендитами.

За даними Правобережної геологічної експедиції встановлено підвищений вміст рудних компонентів в породах масиву, %: дуніти — Cr — 0,1; Ni — 0,05; Co — 0,01; перидотити — Ni — 0,3; Cr — 0,03; Co — 0,002–0,03; Cu — 0,003–1; піроксеніти — Cr — 0,1–0,5, Ni — 0,1–0,3, Co — 0,01–0,03, Cu — 0,003–0,3.

У результаті геохімічного вивчення Жданівське ультрабазитове тіло оконтурено за сольовими ореолами розсіяння. При цьому встановлений кореляційний зв'язок між значеннями вмісту рухомих форм Ni–Co–F (рис. 2). Індикаторними елементами зруденіння можуть слугувати Ni і Co, оскільки F частіше утворює аномалії, пов'язані із зонами тектонічних порушень. Тому математичне моделювання утворення вторинних сольових ореолів на Жданівській ділянці здійснено саме для Ni.

Під час моделювання процесів утворення вторинного сольового ореолу в програму введено такі вхідні дані: розріз осадової товщі — пісок середньозернистий (потужність 9,0 м; $К_ф$ — 5,0 м/добу; D — 10^{-4} м^2/добу), глини з прошарками пісків (потужність 9,5 м; $К_ф$ — 1,0 м/добу; D — $5•10^{-5}$ м^2/добу), глини строкаті, подекуди запісочені (потужність

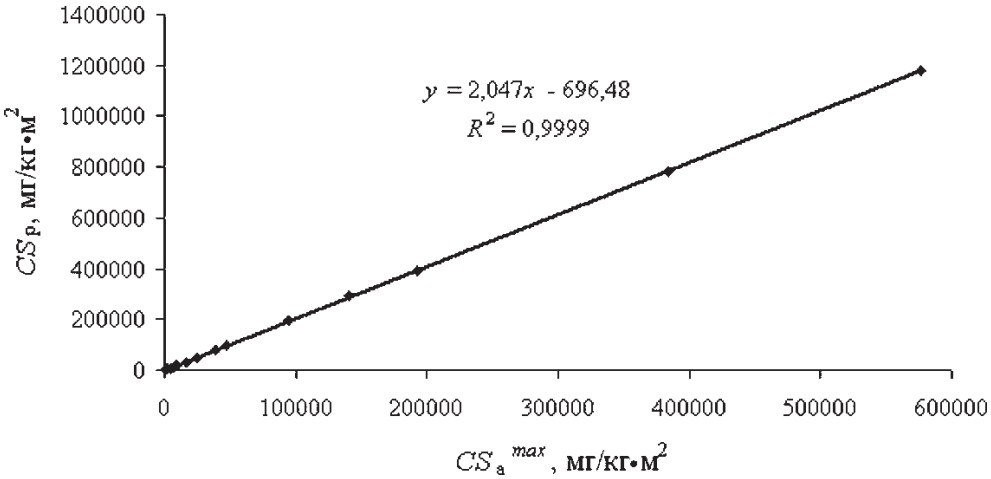


Рис. 4. Залежність розрахункового інтегрального вмісту елемента за площею аномалії сольового ореолу (CS_a^{max}) від інтегрального вмісту елемента за площею рудного тіла ($CS_р$)

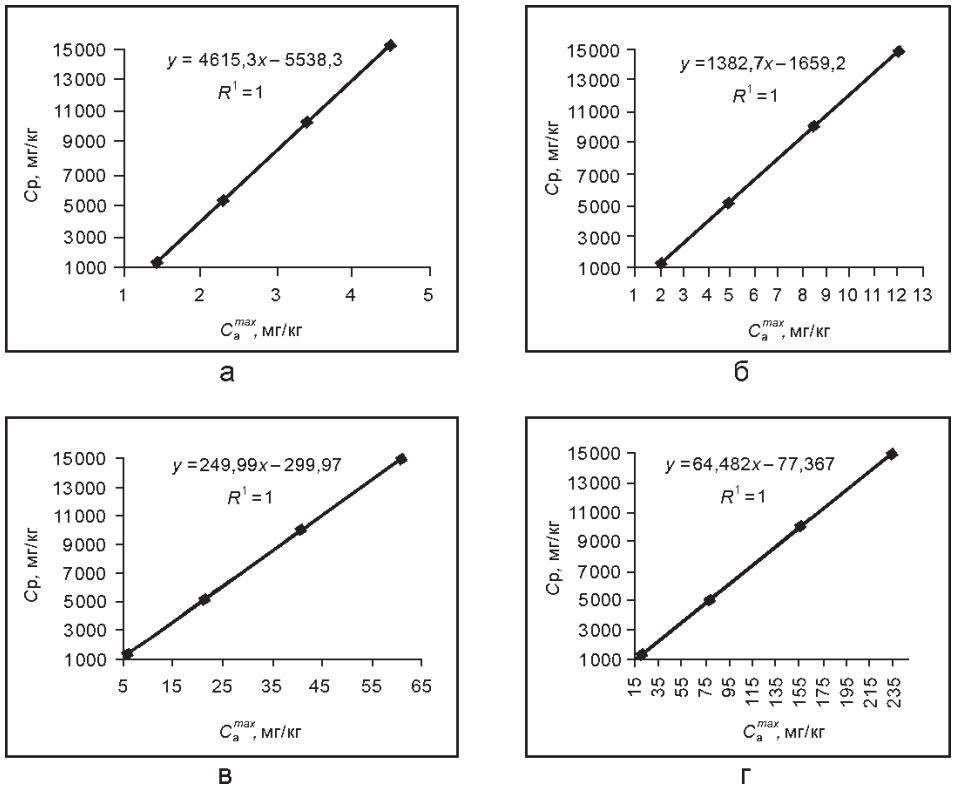
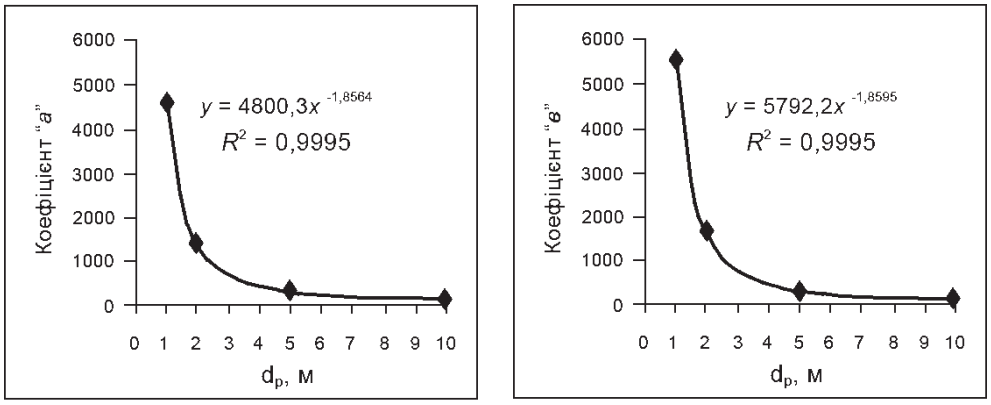


Рис. 5. Залежність вмісту рудного елемента на поверхні рудного тіла ($C_р$) від максимального його вмісту у сольовому ореолі (C_a^{max}). Діаметр рудного тіла, м: *а* — 1,0; *б* — 2,0; *в* — 5,0; *г* — 10,0

9,0 м; $К_ф$ — 0,5 м/добу; D — 10^{-5} м^2/добу). Зроблено припущення, що значення $К_ф$ відповідають значенням швидкості конвекції (u).

Отже, осадова товща загальною потужністю 27,5 м складається з трьох пластів різної потужності, що характеризуються різними коефіцієнтами фільтрації та дифузії. За результатами попередніх робіт встановлено [2], що максимальний аномальний вміст — 1,9 мг/кг, діаметр рудного тіла — 2 м, вміст рудного елемента на поверхні рудного тіла — 1000 мг/кг. Проведені розрахунки для значень вмісту Ni на поверхні рудного тіла від 1000,0 до 15000,0 мг/кг.

Змінюючи так само в кожному з попередніх випадків діаметр рудного тіла від 1,0 до 10,0 м, ми провели низку розрахунків і одержали наступні параметри: максимальний



а *б*

Рис. 6. Залежність коефіцієнтів від діаметра рудного тіла: *а* — коефіцієнт "а", *б* — коефіцієнт "в"

вміст Ni у сольовому ореолі (мг/кг), інтегральний вміст Ni за площею рудного тіла та аномалії сольового ореолу (м^2·мг/кг) (таблиця).

На рис. 3 побудовано ізолінії концентрації Ni в осадовій товщі та графік розподілу елемента у вторинному сольовому ореолі за різних значень концентрації елемента на поверхні рудного тіла. За концентрації Ni на поверхні рудного тіла 1000,0 та 5000,0 переважають процеси фільтрації, за 10000,0 та 15000,0 мг/кг — стає відчутним вплив процесів дифузії, що спричиняє збільшення діаметра вторинного сольового ореолу.

Визначення основних залежностей для розрахунків. Для визначення основних залежностей під час моделювання ми використали результати розрахунків з таблиці, які дозволяють отримати кількісні параметри рудного тіла за відомими параметрами вторинного сольового ореолу.

Апроксимації залежностей були побудовані засобами *MS Excel*. На графіках наведено формули апроксимації та її достовірність (R^2).

Залежність розрахункового інтегрального вмісту елемента за площею аномалії сольового ореолу (CS_a^m) від інтегрального вмісту елемента за площею рудного тіла ($CS_р$) наведена на рис. 4. Вона має лінійний характер, тобто $y = ax - в$, де y — CS_a^m (м^2·мг/кг), x — $CS_р$ (м^2·мг/кг).

Для визначення зв'язку вмісту рудного елемента на поверхні рудного тіла $C_р$ з максимальним вмістом елемента у сольовому ореолі C_a^{max} за різного діаметра рудного тіла побудовано графічні залежності (рис. 5).

Тобто, лінійні рівняння для різних діаметрів рудного тіла за різних значень концентрації рудного елемента на його поверхні виглядають так: $y = 4615{,}3x - 5538{,}3$ (діаметр рудного тіла 1,0 м); $y = 1382{,}7x - 1659{,}2$ (діаметр рудного тіла 2,0 м); $y = 249{,}99x - 299{,}97$ (діаметр рудного тіла 5,0 м); $y = 64{,}482x - 77{,}367$ (діаметр рудного тіла 10,0 м).

Побудовано також залежності значень коефіцієнтів лінійних рівнянь від діаметра рудного тіла (рис. 6).

Сумарна залежність вмісту рудного елемента на поверхні рудного тіла від максимального вмісту елемента у сольовому ореолі та діаметра рудного тіла така:

$$C_р = d_р^{-1,86} \cdot (4800{,}3 \cdot C_a^{max} - 5792{,}2),$$

де C_a^{max} — максимальне значення у сольовому ореолі.

Припускаємо, що кількість точок геохімічного опробування достатня для отримання точного наближення фактичного інтегрального вмісту до розрахункового, використовуємо залежність, наведену на рис. 4:

$$CS_р = 2{,}047 \cdot CS_a^{ф} - 696{,}48.$$

Отримуємо наступну систему нелінійних рівнянь:

$$\begin{cases} C_{\text{Р}} = d_{\text{р}}^{-1,86} \cdot (4800{,}3 \cdot C_{\text{а}}^{max} - 5792{,}2), \\ CS_{\text{Р}} = (C_{\text{Р}} - C_{\Phi}) \cdot \left(\pi \cdot {d_{\text{Р}}}^2 / 4\right), \end{cases}$$

з якої виводимо формулу:

$$CS_{\text{р}} = \left(\pi \cdot d_{\text{р}}^2 / 4\right) \cdot \left(d_{\text{р}}^{-1,86} \cdot \left(4800{,}3 \cdot C_{\text{а}}^{max} - 5792{,}2\right) - C_{\text{ф}}\right).$$

Це нелінійне рівняння вирішується чисельними методами. Але якщо знехтувати C_{Φ}, оскільки воно значно менше від $C_{\text{р}}$, то система вирішується аналітичними методами.

$$d_{\text{р}} = e^{\left(\frac{1}{0{,}14}\ ln\ \left(\frac{4 \cdot \left(2{,}047 \cdot C_{\text{а}}^{\text{ф}} - 696{,}48\right)}{\pi \cdot \left(4800{,}3 \cdot C_{\text{а}}^{max} - 5792{,}2\right)}\right)\right)},$$

$$C_{\text{р}} = d_{\text{р}}^{-1,86} \cdot \left(4800{,}3 \cdot C_{\text{а}}^{max} - 5792{,}2\right).$$

Наприклад, якщо $CS_{\text{а}}{}^{\text{ф}}$ дорівнює 1600 мг/кг•м^2, а $C_{\text{а}}{}^{max}$ — 2 мг/кг, то діаметр рудного тіла складає близько 1,9 м, а концентрація на його поверхні — близько 1100 мг/кг.

Висновки. Завдяки проведеному експериментальному чисельному моделюванню отримано залежність параметрів рудного тіла (діаметра і концентрації рудного елемента на його поверхні) від параметрів вторинного сольового ореолу. Одержані результати надають можливість широко використовувати сольові ореоли розсіяння під час проведення пошуків та локального прогнозування корисних копалин.

1. *Жовинський Е. Я., Крюченко Н. О., Іваненко Н. П.* Застосування математичного моделювання геохімічного поля в пошукових цілях // Мінерал. журн. — 2007. — **29**, № 2. — С. 83–86.
2. *Жовинський Е. Я., Павлюк В. М., Крюченко Н. О. та ін.* Використання геохімічного методу пошуку за рухомими формами хімічних елементів (на прикладі Жданівського масиву) // Там же. — № 1. — С. 82–89.

Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення
ім. М. П. Семененка НАН України, Київ

Надійшла 31.01.2008

РЕЗЮМЕ. Проведено численное моделирование образования вторичного солевого ореола рассеивания химических элементов и построены зависимости параметров солевого ореола от параметров рудного тела. Полученные результаты позволяют широко использовать солевые ореолы рассеивания в ходе поисков и локального прогнозирования полезных ископаемых.

SUMMARY. Numerical simulation of formation of secondary salt halos of dispersion of chemical elements has been conducted and dependences of parameters of salt halos upon the parameters of ore body have been developed. The obtained results allow one to use widely the salt halos of dispersion in the searches and local prediction of minerals.