

© А.В. Лисенко¹, Ю.О. Подчашинський¹, Г.В. Скиба¹,
О.О. Ремезова², 2008

УДК 550.428:553.494:004.43

¹Житомирський державний технологічний університет,
м. Житомир

²Інститут геологічних наук НАН України, м. Київ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОХІМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ
ТИТАНОНОСНИХ ІНТРУЗІЙ
ЗАСОБАМИ ІНФОРМАЦІЙНО-
КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ОБРОБКИ І СТИСНЕННЯ
ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ
(НА ПРИКЛАДІ ФЕДОРІВСЬКОЇ ІНТРУЗІЇ
КОРОСТЕНСЬКОГО ПЛУТОНУ)**

Федорівська інтрузія, з якою пов'язане однойменне апатит-титаномагнетит-ільменітове родовище, розміщується в межах Коростенського плутону, в північно-західній частині Українського щита. Федорівське родовище було опошукано і попередньо розвідано в 1985–2002 рр. Воно приурочене до розшарованої інтрузії, в межах якої розрізняють три пачки порід (верхню, середню і нижню), що вирізняються за структурно-текстурними, мінералогічними та іншими ознаками. *Верхній горизонт* (максимальна потужність 110 м) складений масивним дрібно-середньозернистим олівіновим габро. Виділяють два підгоризонти: нижній – своєрідна перехідна зона, яка містить шліроподібні відокремлення габро-перидотитів потужністю 20–30 см, та верхній, який складається з олівінового більш-менш однорідного за складом і структурно-текстурними особливостями габро. Середній горизонт підстеляє олівінові габро на глибині близько 100 м. Представлений цей горизонт дрібно-середньозернистими, інколи порфіроподібними габро-перидотитами з підлеглими ділянками дрібно-середньозернистого олівінового габро. В межах середнього та верхнього горизонтів описані ділянки смугастої будови з чергуванням прошарків, збагачених на темноколірні мінерали. Нижній горизонт підстеляє габро-перидотити середнього горизонту на глибині 120–140 м. Цей горизонт є перехідним до вміщуючих порід Федорівської інтрузії, тобто є своєрідною “нижньою крайовою групою”. Горизонт являє собою пачку різновидів олівінових габроїдів від лейкократових до мезократових та габро-перидотитів, невитриманої структури та мінерального складу, що плавно переходять один в один. В кожній із зон існують свої закономірності розподілу рудних мінералів залежно від умов

кристалізації. Знання цих закономірностей важливе для створення геолого-генетичних та геолого-економічних моделей родовища.

Геохімічні особливості цієї інтрузії в цілому підпорядковуються тим самим закономірностям, що й інших подібних тіл, розміщених у межах Коростенського плутону, однак існують і певні відміни, пов'язані з особливостями динаміки магми у магматичній камері. Під час геолого-пошукових робіт були намічені групи елементів, пов'язаних із фосфором і титаном, однак ці зв'язки детально досліджені не були. У публікаціях [1, 2] описані процеси формування інтрузії та основні особливості її з позиції петрохімії. Особливості хімічного складу рудних мінералів інтрузії висвітлені в статті [3]. Проте Федорівська інтрузія залишається дослідженою з погляду геохімії лише в загальних рисах. Потрібно виявити взаємозв'язки і зональність різних хімічних елементів у родовищі, що сприятиме його оцінці як комплексного об'єкта, з яким пов'язані не лише фосфор-титанові руди, й ванадій, ніобій, тантал, скандій. У праці [4] зазначено, що Федорівське родовище є одним з найцінніших об'єктів, що містять ванадій.

Метою нашого дослідження було вивчення геохімічної специфіки розподілу між головними елементами та мікроелементами в межах Федорівського родовища ільменіту та встановити характер розшарування в інтрузії у зв'язку із змінами концентрацій цих елементів з глибиною.

Для досягнення поставленої мети нами застосовано методіку кореляційного та вейвлет аналізу. Хоча поняття “вейвлету” та “вейвлет-розкладання” є порівняно новими, однак їх уже широко застосовують в обробці сигналів, зокрема у фізиці, медицині та інших галузях [5–7]. В геоінформаціці їх застосовують для обробки даних у геоінформаційних системах, зокрема графічної інформації, для розв'язання задач апроксимації потенціальних геофізичних полів [8, 9].

Для досягнення поставленої мети нами був проведений кореляційний аналіз геохімічного складу цього родовища на основі даних спектрального аналізу порід шести свердловин (три свердловини А, В, С розташовані посередині Федорівського інтрузивного тіла, а три інші – D, E, F – на його периферії) (рис. 1, а). Кореляційний аналіз виконано за традиційною методикою, описаною у праці [10] за допомогою комп'ютерної програми EXCEL, спектральний аналіз порід здійснено лабораторією Житомирської геологорозвідувальної експедиції. Статистика, що розрахована по алгоритму коефіцієнта кореляції номінально тотожна косинусу кута між градієнтами функцій апроксимації геохімічних полів [11]. Отже, не має підстав для протиставлення статистичних методів обробки геохімічної інформації геометричним методам.

Пошук кореляційних залежностей здійснювали між вмістом головного елемента Р та мікроелементів, а також між вмістом головного елемента

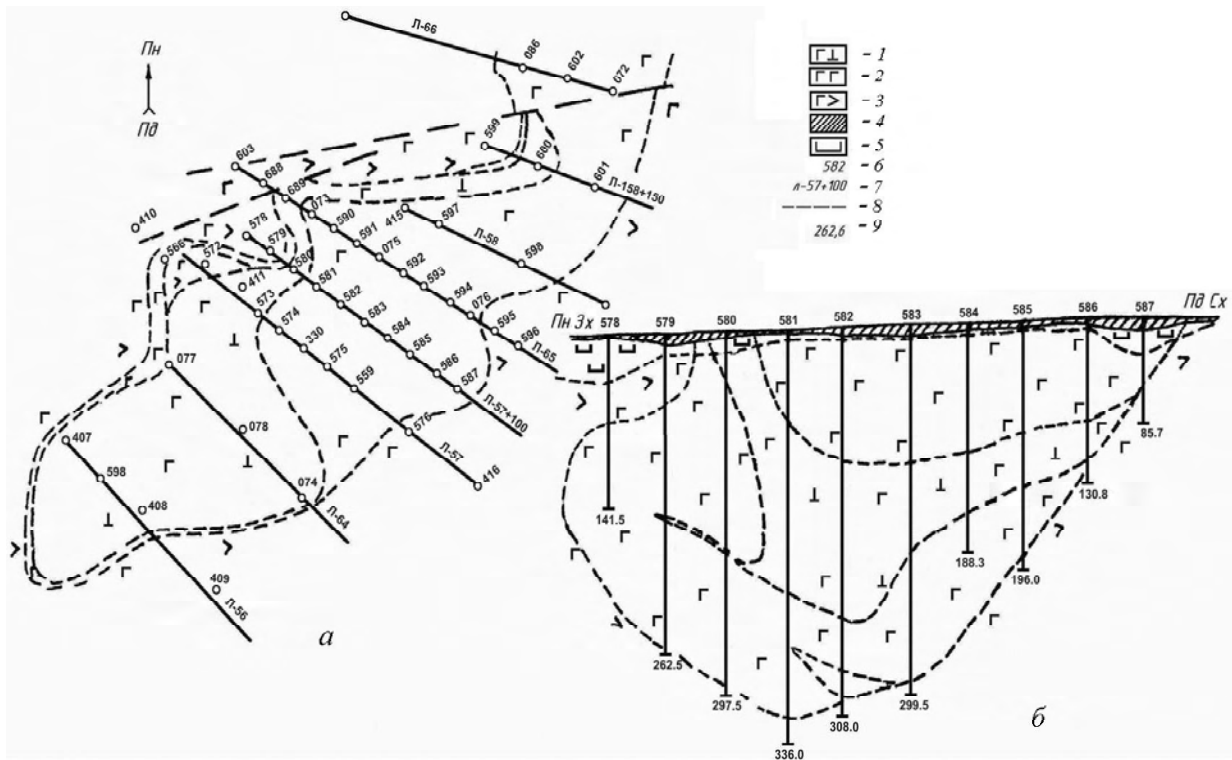


Рис. 1. Геологічна карта (а) та геологічний розріз по лінії 57+100 (б). Федорівська інтрузія. Масштаб 1:10 000: 1 – габро-перидотит рудний; 2 – габро лейкомаєно-кратове рудне; 3 – габро-анортозит безрудний; 4 – осадові відклади; 5 – кора вивітрювання; 6 – свердловина та її номер; 7 – номер лінії свердловини; 8 – тектонічні порушення; 9 – глибина свердловини

Ti та мікроелементів. Кореляційні зв'язки були встановлені між такими елементами: P – з Mn, Cu, Zr, Zn; Ti – з V, Cr, Ga, Ni (табл. 1).

Опис закономірностей згідно з кореляційним аналізом даних. Аналіз отриманих результатів показав, що тісна кореляційна залежність між вмістом Ti та мікроелементів V, Cr, Ga, Ni (склад яких найбільш мінливий по глибині) спостерігається на периферії Федорівського інтрузивного тіла (св. E, F, D, табл. 1) порівняно з серединою (св. A, B, C, табл. 1). Стосовно фосфору і його взаємозв'язків з мікроелементами спостерігається тісна кореляційна залежність між вмістом P і Mn, Cu, Zr, Zn майже для всіх свердловин інтрузивного тіла (св. A, B, C, E, F, табл. 2). Виняток становить св. D, яка знаходиться на периферії тіла. Кореляційні зв'язки між елементами по цій свердловині досить слабкі (низькі коефіцієнти кореляції), що можна пояснити впливом порід ложа каркасу фосфор-титанового зруденіння під час укорінення магми на мінерали-концентратори елементів.

Аналіз одержаних залежностей між головними елементами та мікроелементами попарно дає можливість стверджувати, що найтісніші кореляційні зв'язки існують між такими парами хімічних елементів: Ti і V (рис. 2), P і Cu та P і Zn (рис. 3) майже по всіх свердловинах.

Таблиця 1. Коефіцієнти кореляції між головним елементом Ti та мікроелементами

Свердловина	V	Cr	Ga	Ni
A	0,29412	0,07449	0,327488	0,238612
B	0,30093	0,394073	0,275668	0,328037
C	0,682865	0,20266	0,012533	0,04561
D	0,863837	0,771127	0,556596	0,301877
E	0,686677	0,443374	0,463635	0,728361
F	0,852087	0,662022	0,728325	0,665077

Примітка. Літерою А позначено св. 584, В – св. 588, С – св. 594, D – св. 601, Е – св. 608, F – св. 609.

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції між головним елементом P та мікроелементами

Свердловина	Mn	Cu	Zr	Zn
A	0,572907	0,690618	0,118574	0,663062
B	0,502637	0,75066	0,77568	0,636033
C	0,661762	0,712751	0,620434	0,576526
D	0,162167	0,172452	0,130389	0,295497
E	0,711316	0,72798	0,166778	0,734027
F	0,474278	0,806169	0,64257	0,607356

Опис закономірностей згідно з вейвлет-аналізом даних. Для встановлення характеру розшарування в інтрузивному тілі виконано вейвлет-перетворення сигналу, тобто функції зміни вмісту титану і фосфору за даними спектральних та хімічних аналізів. Спектральні проби відбирали через 4–5 м, хімічні проби – через 2–2,5 м на Федорівському родовищі. Для порівняння якості випробування проаналізовано також дані спектральних аналізів для Каменського масиву габроїдів, де проби відбирали через 0,5–1,0 м. Попередньо для перевірки гіпотези про існування кореляційного зв'язку між вмістом титану та фосфору, побудовано кореляційну матрицю. На основі її аналізу можна стверджувати, що цей зв'язок існує і є значущим. У результаті використання вейвлет-функцій Хаара отримано спектральні характеристики залежностей вейвлет-коефіцієнтів від номеру рядка аналізу в базі даних (глибини відбору проб), що вказують на закономірності розподілу зруденіння титану та фосфору у свердловинах (рис. 4).

Для всіх свердловин Федорівського родовища виявлена наявність чітких трьох темніших смуг, які визначають поділ родовища на три пачки. Ці смуги характерні для спектрів, отриманих на основі вейвлет-функцій Хаара і Добеші. Використання обох варіантів методики дає змогу уточнити тип сигналу.

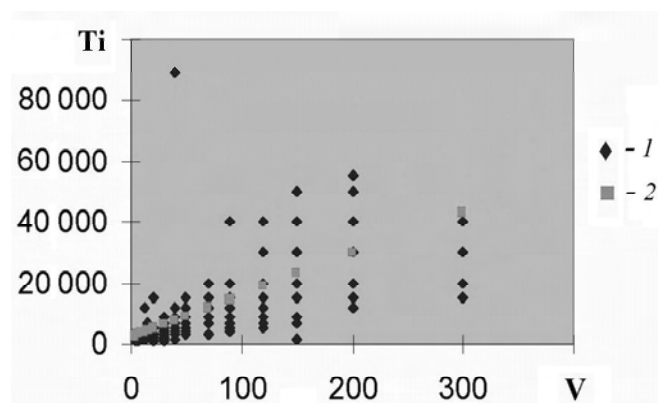


Рис. 2. Кореляційні зв'язки між вмістом Ti і V по св. А: 1 – дослідні значення вмісту Ti; 2 – розраховані

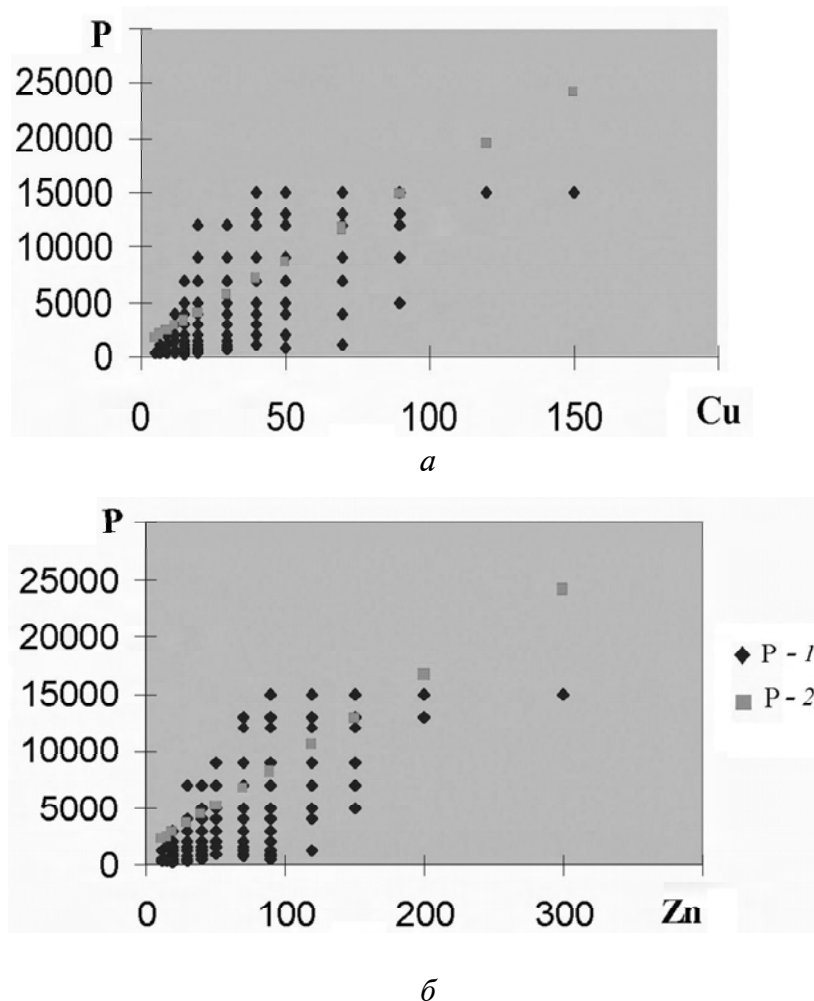
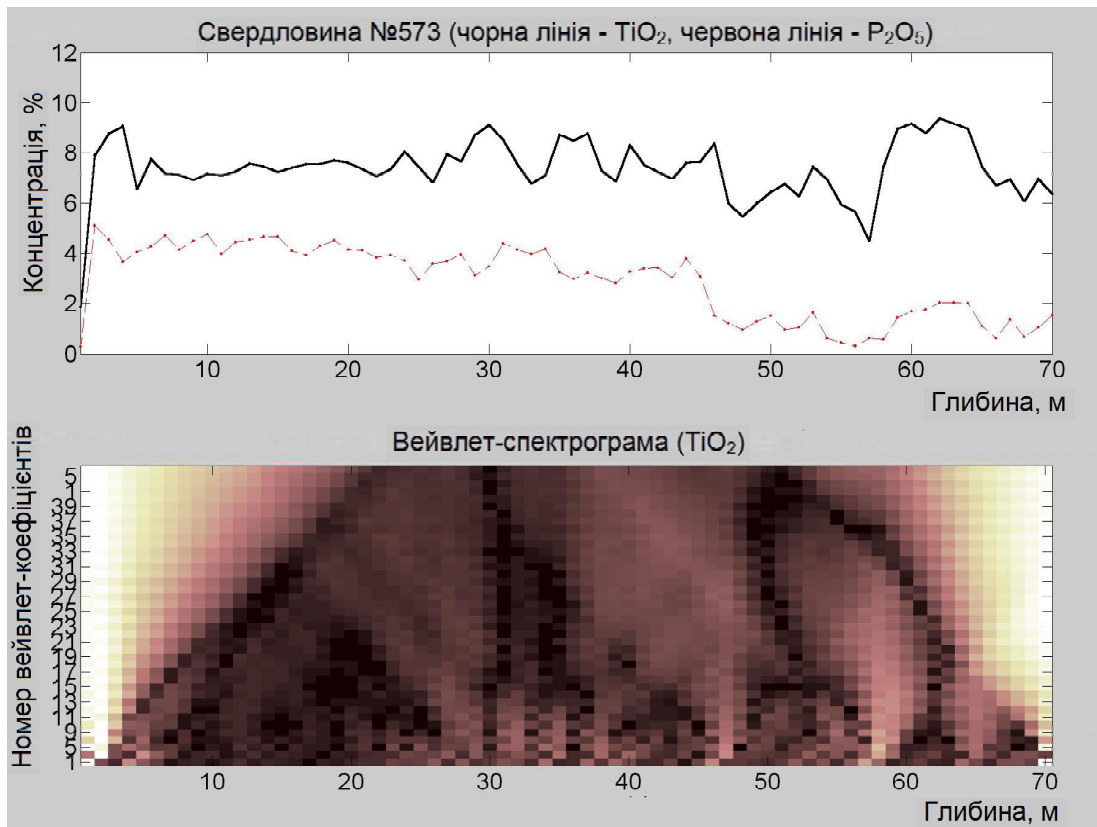
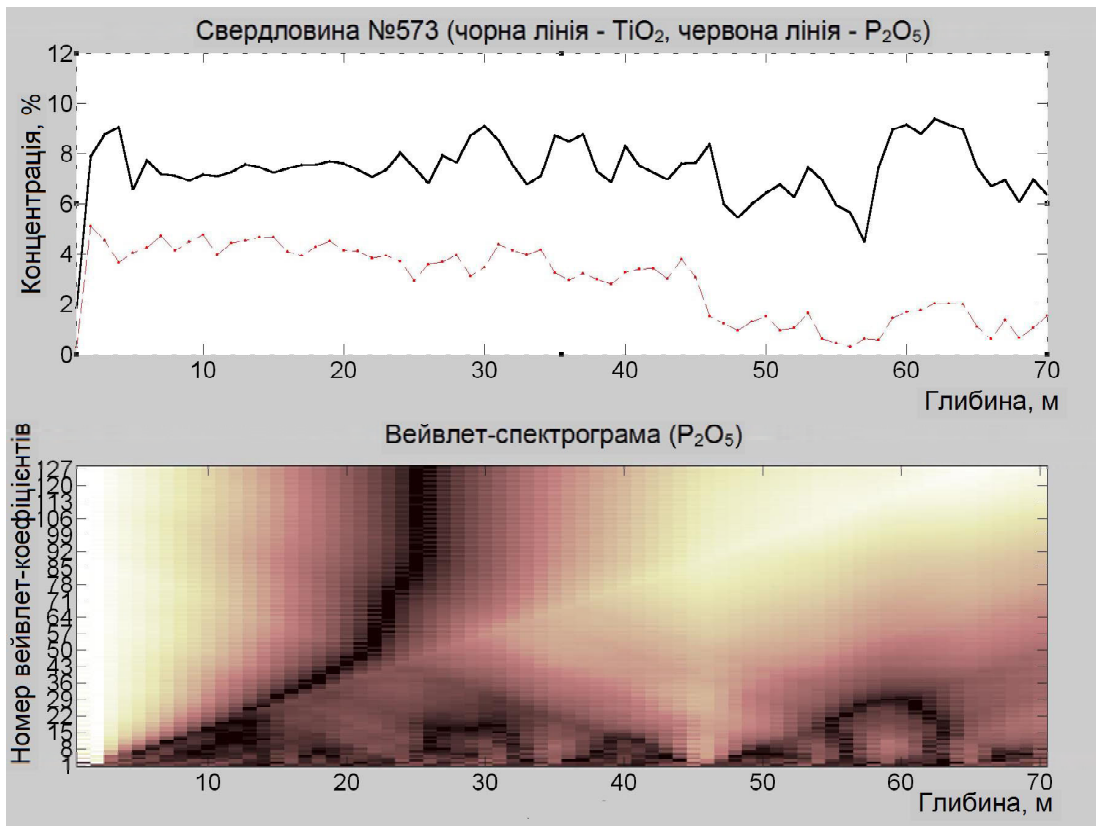


Рис. 3. Кореляційні зв'язки між вмістом P і Cu (а) та P і Zn (б) по св. А: 1 – дослідні значення вмісту P; 2 – розраховані

В останньому випадку зафіксовано більше дрібних ритмів. Між ними пролягають світліші смуги, які вказують на зміни типу сигналу. Як правило, вони прив'язані до контакту габро дрібнозернистого та габро-перидотиту. Саме в середньому горизонті відбувався найінтенсивніший процес кристалізації мінералів титану. Спектральні характеристики сигналу, отримані для фосфору, також показують цю саму закономірність, однак коливання тут більш згладжені в тих місцях графіку, де для титану змінюється тип сигналу (світлі смуги), для фосфору цей сигнал майже не змінюється (темні смуги). Зазначене пояснюється різною поведінкою фосфору в розшарованих інтрузіях, яка досі остаточно ще не з'ясована. Апатит утворюється на пізній стадії першої фази розділення магми. В нижній частині інтрузії у зв'язку з цим фіксується малофосфорний горизонт. Він формувався на межі з охолодженими породами фундаменту інтрузії. Підвищення концентрації фосфору спостерігається в середньому та верхньому горизонтах унаслідок його рухливості та здатності утворювати легкі сполуки з кальцієм – флюїди, що спрямовані угору, до верхньої частині камери. Габро-перидотити являють собою залишкові розплави, з яких



a



b

Рис. 4. Вейвлет-спектрограми даних геохімічного аналізу на основі вейвлету Хаара: *a* – титан (TiO_2); *b* – фосфор (P_2O_5)

відбувалось утворення рудних мінералів. Фосфор має тенденцію до накопичення в цих розплавах. Певні зміни характеристик з глибиною відображають пульсування процесу в магматичній камері, де неодноразово змінювались термодинамічні умови. Більш мінливою виявилася високочастотна частина спектрів як для фосфору, так і для титану.

Такі самі висновки можна зробити і під час розгляду результатів обробки сигналів, отриманих з більшим кроком випробування. Загальна тенденція (поділ на три пачки, що виявляється у вигляді чіткіших смуг) проявляється і тут. Однак дрібніші ритми при цьому губляться.

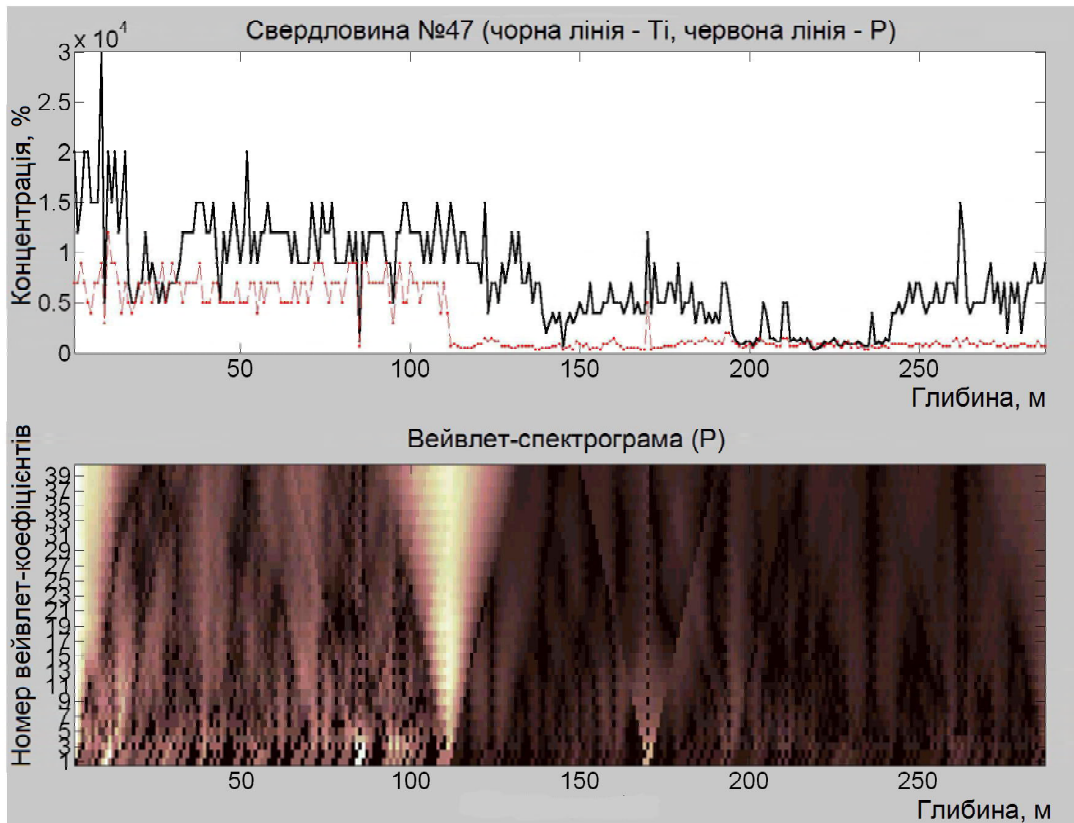
Під час оцінки даних щодо Каменського масиву слід зазначити, що спектральні проби на цьому масиві відбирали з дуже дрібним кроком. Тому вейвлет-аналіз дає змогу отримати найдрібніші флуктуації складу титану і фосфору (рис. 5). Проте досить чітко простежується розрив на рівні 110-го відліку сигналу, що пов'язане з умовами утворення масиву. Як правило, верхня пачка амфіболізована, змінена. В самому масиві теж спостерігаються розшарування і зміна вмісту рудних мінералів [12].

Застосування вейвлетів також можливе для стиснення вимірювальної інформації, отриманої в результаті геохімічного аналізу. Ця інформація має значний обсяг цифрових даних, які потрібно реєструвати та зберігати тривалий інтервал часу. Зменшення ємності запам'ятовуючих пристроїв, призначених для зберігання даних геохімічного аналізу, якраз і можливе на основі застосування вейвлет-стиснення вимірювальної інформації.

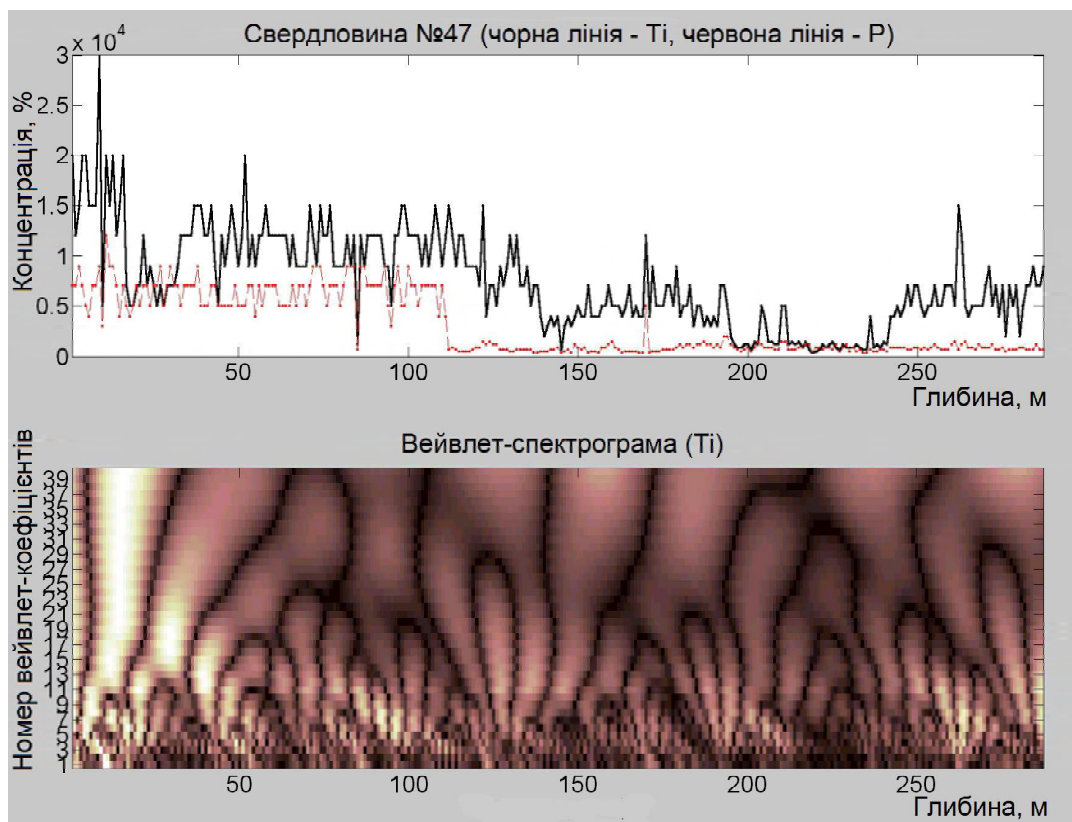
При цьому можливе застосування відомих методів вейвлет-стиснення одновимірної та двовимірної цифрової інформації, зокрема цифрових відеозображень [7, 13], але параметри алгоритму стиснення треба обирати такими, щоб не вносити суттєвих викривлень у вимірювальну інформацію. В цьому випадку межею допустимих викривлень під час стиснення є похибки початкової вимірювальної інформації, зумовлені обмеженою чутливістю методів геохімічного аналізу. Під час стиснення може бути використана як одно-, так і двовимірні інтерпретація даних геохімічного аналізу. Одновимірну інтерпретацію використовують у разі стиснення даних стосовно одного елемента, отриманих для різних глибин однієї свердловини, двовимірну – у разі стиснення даних щодо набору елементів з різних глибин однієї свердловини або різних глибин багатьох свердловин, розташованих у певний спосіб на досліджуваній ділянці родовища.

Висновки.

1. Застосування вейвлет-перетворення для обробки і стиснення вимірювальної інформації, отриманої методами геохімічного аналізу, дає змогу виділити дрібні флуктуації та особливості поведінки сигналів, що відповідають цій інформації. Під час стиснення можна використовувати



a



б

Рис. 5. Вейвлет-спектрограми даних геохімічного аналізу: *a* – вейвлет Хаара, фосфор (Р); *б* – вейвлет Добеші 6-го порядку, титан (Ті)

ти як одно-, так і двовимірну інтерпретацію просторового розподілу та координат для вимірювальної інформації. До того ж можливе застосування відомих методів вейвлет-стиснення одно- та двовимірної цифрової інформації, зокрема цифрових відеозображень. Межею допустимих викривлень під час стиснення є похибки початкової вимірювальної інформації, зумовлені обмеженою чутливістю методів геохімічного аналізу.

2. За допомогою вейвлет-аналізу можливо отримати характеристику розподілу хімічних елементів у рудному тілі. Чітко фіксуються межі шарів з різними умовами кристалізації, які позначають як поля зміни характеристик сигналу. Детальність її (отримання дрібніших ритмів) залежить від кроку випробування.
 3. У межах розшарованих масивів габро виділяють групу хімічних елементів, які корелюють з титаном (V, Cr, Ga, Ni) та фосфором (Mn, Cu, Zr, Zn). Подальшим напрямом дослідження може бути виявлення зональності елементів по розрізу тіла та кореляційних зв'язків у кожній пачці інтрузиву.
1. Ремезова О.О. Проблеми дослідження розшарованих інтрузивних тіл Українського щита // Геол.-мінерал. вісн. – 2005. – № 1. – С. 61–67.
 2. Ремезова О.О. До питання вивчення петрохімічних особливостей та генезису габроїдів Федорівського розшарованого тіла // Форум гірників-2005. Матеріали міжнар. конф., 12–14 жовтня 2005 р. – Дніпропетровськ, 2005. – Т. 4. – С. 27–33.
 3. Шумлянський Л.В., Дюшен Ж.-К. Рудні мінерали Федорівського родовища фосфору та титану // Наукові праці інституту фундаментальних досліджень. – К.: Логос, 2005. – Вип. 9. – С. 83.
 4. Металлические и неметаллические полезные ископаемые Украины. Т.1 Металлические полезные ископаемые // Д.С. Гурский, К.Е. Есипчук, В.И. Калинин и др. – Киев; Львов: Центр Европы, 2005. – 785 с.
 5. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
 6. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. – М.: Физматлит, 2003. – 176 с.
 7. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике: 2-е изд., пер. и доп. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 400 с.
 8. Долгаль А.С., Пугин А.В. Фрактальный подход к аналитической аппроксимации потенциальных геофизических полей // Геоінформатика. – 2006. – № 2. – С. 34–39.
 9. Жизняков А.Л., Садыков С.С. Вопросы применения вейвлет-преобразований для обработки данных в ГИС // Там же. – 2005. – № 1. – С. 3–6.
 10. Родионов Д.А., Коган Р.И., Голубева В.А. Справочник по математическим методам в геологии. – М.: Недра, 1987. – 335 с.
 11. Мягков В.Ф. Вопросы теории математической обработки геохимической информации // Методы обработки цифровой информации при геохимических поисках. – М., 1975. – С. 34–40.
 12. Кононов Ю.В. Металлоносность габброидных пород Украинского щита. – Киев: Наук. думка, 1985. – 156 с.
 13. Goswami J.C., Chan A.K. Fundamentals of Wavelets. Theory, Algorithms and Applications. – A Wiley-Interci. Publication, John Wiley & Sons, Inc, 2002. – 306 с.