

© О.В. Шабатура, 2010

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
м. Київ

РЕКОНСТРУКТИВНА НЕПАРАМЕТРИЧНА ГЕОДИНАМІЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ ГРАНІТОЇДІВ ЗА ПЕТРОФІЗИЧНИМИ ДАНИМИ (НА ПРИКЛАДІ ПОРІД УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА)

Результати генетичного петрофізичного аналізу гранітоїдів переважно представлені непараметричними даними. Шляхом виконання послідовних геоінформаційних процедур їх обчислення за допомогою методу дерев класифікації можна одержати класифікаційну модель і дискримінантні петрофізичні критерії, що добре описують належність гранітоїдних утворень до геодинамічних класів.

Ключові слова: гранітоїди, непараметрична класифікація, геодинаміка, Український щит.

Постановка проблеми. Методи класифікації гранітоїдів, що ґрунтуються на аналізі їх складу (геохімічного, мінерального, вмісту включень) мають у своєму арсеналі добре розроблений апарат геодинамічної інтерпретації відомостей щодо формування порід. Дискримінантні геохімічні, петрохімічні діаграми (*SIAM* – Б. Чаппела, А. Вайта, гранітів А-типу: Дж. Вейліна, Г. Ебі; геодинамічних обстановок формування гранітоїдів Дж. Пірса і Дж. Канна; Дж. Коббінга та інших) на основі кількісного вивчення розподілу компонентів та індикаторних хімічних елементів дозволяють зіставляти типи гранітоїдів із геодинамічними обстановками. Найвідоміша сьогодні класифікація гранітоїдів *SIAM*, за якою можна встановити петрогенезис таких типів гранітоїдів: *M*, що відповідає обстановками субдукційних внутрішньоплітно-океанічних зон, мантійних дериватів; *I* – інфракрустальних глибинних субдукційних зон; *S* – субдукційних зон із суперкрустальними осадовими джерелами; *A* – анорогенним виплавкам, які приурочені до стабільних кратонів, рифтових зон. Істотною перевагою таких класифікацій є застосування числових методів обробки інформації щодо хімічного складу, петро- і геохімічних показників, ізотопних характеристик елементів тощо, що є важливою складовою об’єктивного підходу до їх геодинамічної інтерпретації. Однак, існує величезний масив геологічних даних, представлених непараметричною інформацією, тобто такою, де параметри статистично не оцінені.

Наприклад петрографічна характеристика порід, результати аналізу речовинно-структурних формацій і комплексів порід тощо.

Фізичні властивості гірських порід (гранітоїдів зокрема) містять генетичну інформацію щодо умов їх формування, але її важко одержати через надзвичайну варіативність петрофізичних характеристик у межах навіть однотипних геологічних об’єктів. Різко знижує геологічну інформативність для петрофізичного аналізу гетерогенність досліджуваних ознак, які мають різний рівень статистично-кількісного і генетичного вивчення.

Мета статті. Один із підходів для подолання цієї проблеми полягає у розробці багатомірної непараметричної класифікації гранітоїдів, яка охоплювала б масив різнобічних даних та враховувала структурну матрицю зв’язку фізичних властивостей із породою. Ця інформація є надзвичайно важливою, оскільки показує ієрархічну структурованість геологічних об’єктів, їх взаємозв’язок із динамічними чинниками. Зазвичай вона передана через особливості розподілу петрофізичних ознак, їх кореляцію та розмежування.

Реалізація створення непараметричної класифікації можлива у два етапи: 1 – генетична класифікація породних утворень на основі петрофізичного аналізу вихідних даних, представлених у вигляді матриці величин фізичних властивостей порід [3]; 2 – математичне моделювання з використанням результатів петрофізичної генетичної класифікації, що має на меті отримання реконструктивної генетичної класифікації гранітоїдів, тобто одержання кількісних співвідношень ознак, що характеризують умови пороудоутворення класифікованих об’єктів.

Широка сфера застосування методів непараметричної класифікації робить їх привабливим інструментом аналізу даних. Універсальним є метод дерев класифікації [7–9], широко застосовуваний у таких прикладних областях як медицина (діагностика), програмування (аналіз структури даних), ботаніка (класифікація) і т. д. Поширення досвіду класифікації непараметричних даних на геологію дасть змогу повніше залучати великі обсяги інформації до обробки числовими методами в автоматизованому режимі, виконувати математичне моделювання, одержувати нові результати у геопрогнозі, розвідці та пошуках корисних копалин.

Основний матеріал. *Петрогенетична кластеризація.* Формування масиву ознак, які використовуються у непараметричній класифікації, здійснене на основі комплексного підходу до петрофізичного аналізу (свідectво про відкриття “Явление петрофизической фиксации геодина-

мических процессов гранитоидными образованиями”, автори М.І. Толстой, А.П. Гожик, А.В. Сухорада, О.В. Бобров, реєстраційний № 417-А, диплом №333, м. Москва, 5.06.2007) і відповідної петрогенетичної класифікації гранітоїдів [3, 4].

Петрошільнісна класифікація гранітоїдів ґрунтується на сумісному аналізі густинних, ємнісних, пружних параметрів, і у найбільш генералізованому вигляді відображає зміни розміру упаковки кристалічної форми кремнекисневих ґраток мінералів гранітоїдів внаслідок дії зовнішніх чинників. Важливою ознакою є рівень глибинності формування порід (виражений у одиницях шкали “більше–менше”). Окрему групу реконструктивних ознак становлять типи деформацій гірських порід, визначених на основі вивчення поведінки деформаційної компоненти відкритої пористості. Відомо, що цей параметр, на відміну від загальної пористості, залежить, головною мірою, від типу деформацій і пружних параметрів V_p , V_s . Швидкість розповсюдження пружних хвиль сягає максимальної величини в недеформованих відмінах і зменшується через деформації будь-якого типу (через крихкі деформації – найбільш різко) [1–3].

Зіставлення широкого кола петрофізичних характеристик гранітоїдів дозволило виявити їх певну кластеризацію. Завдяки залученню петрографічної інформації окреслився більш-менш чіткий поділ петрофізичних кластерів із жорстким зв'язком етапності становлення гірських порід, що відповідають умовам їх формування [2–5]. З метою розділу впливу породоутворювальних і епігенетичних процесів у петрошільнісній класифікації застосовано терміни “первинно” (головні процеси становлення породи – протокристалізація, перекристалізація) і “вторинно” (інтегральний вплив наступних перетворень – метаморфізму, метасоматозу, деформацій тощо).

Петромагнітна класифікація гранітоїдів ґрунтується на виокремленні чинників, які залежать від умов утворення головним чином рудних мінералів – основних носіїв магнетизму гірських порід. Породоутворювальні мінерали гранітоїдів є або діамагнітними (кварц, польові шпати), або парамагнітними (слюди, амфіболи, піроксени, гранати). Навіть невеликі домішки феромагнітних мінералів (магнетиту, титаномагнетиту) повністю визначають магнітні властивості породи в цілому. Валовий аналіз магнітних властивостей гранітоїдів різних регіонів дозволив А.В. Сухораді встановити емпіричну закономірність бімодального розподілу магнітної сприйнятливості, що має мінімум у області близько 0,001 од. СІ. Ця величина виступає критерієм поділу порід

на “немагнітний” і “магнітний” типи гранітоїдів. Належність до “немагнітного” типу засвідчує переважну роль фемічних мінералів у формуванні індуктивної намагніченості порід, а належність до “магнітного” типу – наявність достатньої кількості феромагнетиків. Реконструктивні ознаки, одержані завдяки цій петромагнітній класифікації – сингенетичний або епігенетичний тип магнітності порід, якісний рівень результатів визначення фугітивності кисню.

Петрорадіоактивна класифікація гранітоїдів ґрунтується на вивченні розподілу потужності дози інтегрального гамма-випромінювання урану, торію і калію. Наявність і концентрація акцесорних радіоактивних мінералів (основних носіїв радіоактивних елементів) опосередковано виступають індикаторами зміни фізико-хімічних і термодинамічних умов формування порід і надають важливу генетичну інформацію.

Паралельне вивчення вказаних фізичних параметрів по одних зразках, супроводжене петрографічними дослідженнями, дозволяє зробити достатньо обґрунтовані висновки щодо умов утворення порід:

- характеристики тектонічного режиму (стиск – всебічний, нерівномірний, однобічний; розтяг – одновісний, лінійної зони тощо), які ґрунтуються на інформації щодо величини і співвідношення швидкостей розповсюдження пружних хвиль, їх анізотропії (зокрема анізотропії V_S), а також щодо величини і природи загальної і ефективною пористості;
- характеристики напружено-деформаційних умов (тип і відносна інтенсивність деформацій), які ґрунтуються на аналізі величини і співвідношення швидкості розповсюдження пружних хвиль і типів пористості;
- рівні глибинності формування порід за комплексним аналізом структурної крихкості, кристалохімічної щільності і об’ємної густини, а також із врахуванням сингенетичних величин загальної і ефективною пористості;
- окиснювально-відновні умови, які встановлюються на основі аналізу розподілу магнітних параметрів та їх кореляції з петрохімічними показниками.

Для проведення досліджень обрана вибірка магматичних порід Українського щита, що складається із 67 петротипів [3]. Проведений петрофізичний аналіз за масивом ознак фізичних властивостей дав змогу отримати ряд характеристик геодинамічних умов їх формування і епігенетичних перетворень. У кодованому вигляді ці ознаки наведені у таблиці.

Предикаторні ознаки непараметричної генетичної класифікації*

Номер з/п	Петротип	Синпаалеотектонічний режим	Епіпаалеотектонічний режим	Рівень глибини	Фугтивність кисню	Термінальна вершина класифікації
1	Гранодіорит жежелівський	СПР-ОС-ПД	ЕПТ-КР-КД	ГМ2	ФН	9
2	Діорит букинський	СПР-НР-ПД		ГМ3	ФВ	6
3	Кв. монцодіорит букинський	СПР-НР-ПД		ГМ3	ФВ	6
4	Кв. монцодіорит тригурський	СПР-НР-ПД		ГМ2	ФВ	6
5	Гранодіорит олександрівський	СПР-КУ-ДН		ГМ2	ФН	9
6	Кв. монзоніт тянський	СПР-КУ-ДН		ГМ2	ФН	9
7	Граніт екатеринівський	СПР-НР-КД		ГМ1	ФВ	9
8	Граніт кам'яноголівський	СПР-НР-КД		ГМ1	ФВ	9
9	Граніт кишинський	СПР-НР-ПД		ГМ1	ФВ	7
10	Граніт устинівський	СПР-НР-ДН		ГМ1	ФВ	7
11	Гранодіорит мухариївський	СПР-НР-ПД		ГМ2	ФВ	6
12	Граніт смелянівський	СПР-НС-ПД	ЕПТ-КР-КД	ГМ1	ФВ	9
13	Граніт короєнський	СПР-ОС-ДН		ГГ	ФВ	4
14	Граніт лзниківський	СПР-НР-ПД		ГГ	ФВ	4
15	Граніт острівський	СПР-НР-ПД		ГГ	ФВ	4
16	Граносієніт чолівський	СПР-НР-ПД		ГГ	ФВ	4
17	Рапаківі малинський	СПР-НС-ПД		ГГ	ФВ	4
18	Рапаківі потієвський	СПР-НС-ПД		ГМ1	ФВ	9
19	Граніт іскренський	СПР-КР-ПД		ГМ2	ФВ	13
20	Граносієніт русько-полянський	СПР-НР-ПД		ГМ1	ФВ	9
21	Кв. монзоніт хлестунівський	СПР-ОС-ДН		ГМ1	ФВ	11
22	Монцодіорит хлестунівський	СПР-ОС-ДН		ГМ2	ФВ	9
23	Рапаківі корсунський	СПР-КУ-ДН		ГМ1	ФН	9
24	Рапаківі шполянський	СПР-НР-ДН	ЕПТ-КУ-КД	ГМ1	ФВ	9
25	Граніт боков'янський	СПР-КР-ДН		ГМ2	ФВ	13
26	Граніт крупський	СПР-КУ-ДН	ЕПТ-КР-КП	ГМ1	ФВ	13
27	Граніт новоукраїнський	СПР-НС-ПД	ЕПТ-КР-КД	ГМ2	ФН	13
28	Кв. монзоніт іванівський	СПР-КР-ДН	ЕПТ-НС-КД	ГМ1	ФВ	12
29	Кв. сієніт крупський	СПР-НР-КД		ГМ2	ФВ	13
30	Лейкограніт новоукраїнський	СПР-КУ-ДН	ЕПТ-КР-ПД	ГМ1	ФВ	13
31	Лейкограніт орхівський	СПР-КУ-ДН		ГМ2	ФН	13
36	Чарнокіт боков'янський	СПР-КР-ДН		ГМ2	ФВ	13
37	Кв. діорит обіточненський	СПР-КУ-ДН		ГМ3	ФВ	6
38	Тондіт осипенківський	СПР-КР-ДН		ГМ3	ФВ	6
39	Граніт осницький	СПР-ОС-ДН		ГМ1	ФВ	9
40	Гранодіорит осницький	СПР-ОС-ДН		ГМ1	ФВ	6
41	Гранодіорит судилківський	СПР-ОС-ДН		ГМ2	ФН	6
42	Гранодіорит ясногірський	СПР-ОС-ДН		ГМ1	ФВ	6
43	Діорит вирівський	СПР-ОС-ДН		ГМ2	ФВ	6
45	Кв. монцодіорит вирівський	СПР-ОС-ДН		ГМ2	ФВ	6
46	Монцодіорит вирівський	СПР-ОС-ДН		ГМ2	ФВ	6
47	Граніт львівський	СПР-НР-КД		ГМ1	ФВ	12
48	Граніт пержанський	СПР-НР-КД		ГМ1	ФВ	12
49	Граніт сирницький	СПР-НР-КД		ГМ1	ФВ	12
50	Граніт хочинський	СПР-НР-КД		ГМ1	ФВ	12
51	Сієніт яструбський	СПР-НР-КД		ГМ1	ФВ	12
52	Граніт новоянісольський	СПР-ОС-КД	ЕПТ-КР-КД	ГМ2	ФВ	13
57	Кв. діорит тепіївський	СПР-КУ-ДН		ГМ2	ФВ	11
58	Ендербіт старокримський	СПР-КУ-ДН	ЕПТ-КР-ПД	ГМ2/4	ФВ	6
59	Граніт дмитрівський	СПР-НР-ПД		ГМ2	ФВ	6
60	Граніт караєвський	СПР-КР-КД		ГМ1	ФВ	6
63	Граносієніт кальміуський	СПР-КР-ДН	ЕПТ-КР-КД	ГМ1	ФВ	6
67	Чарнокіт хлібодарівський	СПР-ОС-ПД		ГМ3	ФВ	6

* Пояснення до таблиці наведені у тексті.

Однією із важливих передумов здійснення непараметричної класифікації є калібрування предикаторних змінних (тобто тих, за якими здійснюється прогнозне віднесення до того чи іншого кластеру класифікації). Калібрування полягає у переведенні їх у певну шкалу одиниць: інтервальну або категоріальну, що дасть змогу використовувати ці дані як операнди при чисельному обрахунку.

Відповідно, глибинність (Г) має 5 ґрадацій інтервальної шкали: дуже мала (гіпабісальна – ГГ), мала, середня, велика (рівні мезоабісальної фації, відповідно ГМ1, ГМ2, ГМ3), дуже велика (абісальна фація ГА).

Син- і епіпалеотектонічні режими (СПР і ЕПТ) – 4 ґрадації категоріальної шкали: квазівсебічне розуцільнення (КР), неоднорідний розтяг (НР), неоднорідний стиск (НС), квазівсебічне уцільнення (КУ).

Син- і епігенетичні деформації – 3 ґрадації: пластичні (ПД), крихкі (КД), не проявлені (ДН).

Первинна і вторинна магнітність (ПМ і ВМ) – 3 ґрадації: немагнітні, магнітні, не проявлені (МН).

Фугітивність кисню – 3 ґрадації: низька (ФН), висока (ФВ), невизначена.

Загальна радіоактивність (ЗР) – 4 ґрадації: калієва (К), торієва (Th), уранова (U) та змішані.

Метод непараметричної класифікації. Автоматизований підхід до визначення належності спостережень (петротипів) до того чи іншого класу категоріальних змінних реалізується у методі дерев класифікацій, який поєднує елементи дискримінантного аналізу, кластерного аналізу, непараметричної статистики, нелінійного оцінювання [6].

Універсальність застосованого підходу полягає у здатності виконувати одномірне галуження для аналізу внеску кожної змінної, що дозволяє оперувати даними різних калібрувань. Під час обрахунку вхідні дані зазнають конвеєрної прогонки за методом регресійного аналізу із такими заданими параметрами: 1 – вибір критерію точності прогнозу; 2 – вибір типу галуження; 3 – визначення моменту переривання галуження; 4 – визначення задовільного розміру дерева.

1. Найточнішим прогнозом вважається той, який пов’язаний із найменшою ціною обчислень (інакше кажучи, часткою неправильно класифікованих спостережень). Для забезпечення мінімальної частки неправильно класифікованих спостережень необхідно провести вибір апріорних ймовірностей, пропорційних розмірам класів, а ціну помилок класифікації вибирати однаковою для всіх класів.

Апріорні ймовірності формують тестову, а об’єкти з відомими геодинамічними обстановками формування – навчальну вибірку. Цей підхід дозволяє уникнути зворотно-корелятивного зв’язку між виборками, унеможлиблює створення штучних об’єктів класифікації.

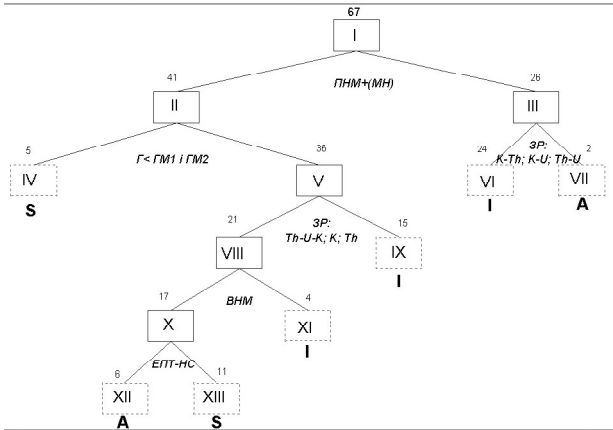
2. Вибір типу галужень виконують послідовно, від початкової вершини, переходячи до вершин-“нащадків” аж до припинення галуження, або ситуації, коли “нерозгалужені” вершини-“нащадки” не стануть термінальними (тобто кінцевими). Переглядаючи всі можливі варіанти галуження за кожною предикаторною змінною обираємо ту, яка дає найбільший ріст критерію згоди. У випадку категоризувальної предикаторної змінної, яка набуває на даному вузлі k значень, існує рівно $2^{(k-1)} - 1$ варіантів розбивання множини її значень на дві частини. У випадку порядкового предикатора (інтервальна шкала), який має у вузлі k різних рівнів існує, $k - 1$ точок розділу.

У якості критерію згоди використовують міру Джині (суму всіх попарних добутоків відносних розмірів класів), яка набуває нульового значення, якщо у даній вершині є всього один клас, максимальною – якщо розміри всіх класів однакові.

3. Припинення операції галуження здійснювали за числом некласифікованих спостережень (вибирали рівним 0), при якому галуження триває доти, доки всі термінальні вершини не стануть “чистими” і будуть містити не більше, ніж апріорно задане число спостережень.
4. Вибір “задовільного” дерева класифікацій реалізовували через виконання крос-перевірки тестової навчальної вибірки. Якщо ціни на тестовій вибірці будуть більшими, ніж на навчальній, це свідчатиме про поганий результат крос-перевірки. Тоді слід вишукувати дерево іншого розміру.

Висновки і обговорення. Результати непараметричної класифікації показали суттєву неоднорідність розподілу генетичних класів гранітоїдів (рисунок) і яскраву відмінність петрофізичних критеріїв, за якими відбувалося галуження.

Віднесення об’єкту IV до класу S-гранітоїдів послідовно передається через петрофізичні критерії первинної магнітності (яка має переважно пірогінову природу) і невеликих рівнів глибинності, що підтверджується їх геологічною належністю до суперкрустальних



Дерево непараметричної класифікації гранітоїдів УЩ (пунктиром позначені кінцеві об’єкти класифікації, літера знизу відповідає *SIAM*, цифра угорі – кількість об’єктів; код нижче не термінальних об’єктів – критерій розгалуження)

верхньокорових рівнів генерації розплавів. Більш глибинні неоднорідно ущільненні парамагнітні відміни (об’єкт XIII) явно мають субдукційну обстановку формування.

Об’єкт VI, який відноситься до *I*-типу гранітоїдів, представлений синтетектонічними і парамагнітними утвореннями. Магнітні різновиди цього типу гранітоїдів містять магнетит, який утворюється у породах змішаного і гібридного більш лужного складу (об’єкт IX). Прогресивне нарощування фугітності кисню із активізацією стресової тектоніки призводить до формування відмін об’єкту XI.

Об’єкти, що відповідають анорогенному типу гранітоїдів (об’єкти VII і XII) є продуктами диференціації лужно-базальтової магми, що і обумовлює їх різку відмінність у петрофізичних критеріях класифікації.

Крос-перевірка тестових і навчальних виборок показала добру співставність результатів прогнозування за непараметричною класифікацією. Показано правильне віднесення до класу гранітоїдів із відповідною геодинамічною обстановкою, встановлено ряд критеріальних петрофізичних ознак, за якими відбувається поділ класів. Цей аспект досліджень дає змогу виконати наступний крок – визначити ряд геофізичних критеріїв для проведення співставлення, кореляції, розмежування геологічних об’єктів гранітоїдного складу.

1. *Звягинцев Л.И.* Деформация горных пород и эндогенное рудообразование. – М., 1978. – 174 с.
2. *Петрофизика* гранитоидов Украинского щита / Толстой М.И., Чекунов А.В., Щербатов И.Б. и др. – К.: Наук. думка, 1987. – 240 с.
3. *Петрогеохімія і петрофізика* гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання / Толстой М.И., Гасанов Ю.Л., Гожик А.П. та ін. – К., 2003.
4. *Толстой М.И., Гожик А.П.* Петрофизическая характеристика геодинамических условий формирования гранитоидных образований // Изв. АН СССР. Сер.геол. – 1989. – № 7. – С. 43–49.
5. *Толстой М.И.* Некоторые теоретические посылки геологического моделирования раннекембрийского гранитообразования // Вестн. Киев. ун-та. Прикл. геохимия и петрофизика. – 1991. – Вып. 17. – С. 3–14.
6. *Шаранов И.П.* Применение математической статистики в геологии. – М., 1971. – 224 с.
7. *Breiman L., Friedman J. H., Olshen R.A., Stone C.J.* Classification and regression trees. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, 1984.
8. *Comparison of petrophysical and rock geochemical data in the Tampere–Hameenlinna area, southern Finland / Lahtinen, Raimo and Korhonen, Juha V.* – Geological Survey of Finland. – 1996. – Bul. 392. – 45 p.
9. *Ripley B.D.* Pattern recognition and neural networks. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996.

Реконструктивная непараметрическая геодинамическая классификация гранитоидов по петрофизическим данным (на примере пород Украинского щита) А.В. Шабатура

РЕЗЮМЕ. Результаты генетического петрофизического анализа гранитоидов преимущественно представлены непараметрическими данными. Путем использования последовательных геoinформационных процедур их вычислений с помощью метода деревьев классификации можно получить классификационную модель и дискриминантные петрофизические критерии, хорошо описывающие принадлежность гранитоидных образований к геодинамическим классам.

Ключевые слова: гранитоиды, непараметрическая классификация, геодинамика, Украинский щит.

Reconstructive non-parametric geodynamical classification of granitoids with petrophysical data (on example of Ukrainian Shield rocks) O.V. Shabatura

SUMMARY. Mostly, the results of genetic petrophysical analysis of granitoids are presented by non-parametric data. In case of using of successive geoinformational processing of their calculations, with the trees classifications, a classification model and discriminates petrophysical criteria are obtained.

Keywords: granitoids, non-parametric classification, geodynamics, Ukrainian shield.