

Вимірний установкою AMNB позірний опір ρ_n на поверхні тонкого провідного шару і його теоретичне значення ρ_n^T описується співвідношеннями:

$$\rho_n = \pi \frac{AB^2 - MN^2}{4MN} \cdot \frac{\Delta U}{I} = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{AB}{2} \cdot \frac{1 - (MN/AB)^2}{MN/AB} \cdot \frac{1}{S} \cdot \ln \frac{1 + MN/AB}{1 - MN/AB} \right] \quad (18)$$

$$\rho_n^T = (AB/2)/S. \quad (19)$$

Таким чином, відхилення значення ρ_n від ρ_n^T матиме вигляд:

$$\delta_n = (\rho_n / \rho_n^T - 1) \cdot 100\% = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{1 - (MN/AB)^2}{MN/AB} \cdot \ln \frac{1 + MN/AB}{1 - MN/AB} - 1 \right] \cdot 100\%. \quad (20)$$

Графіки відхилень δE і $\delta \rho$ для різних співвідношень розмірів лінії MN по відношенні до лінії живлення AB представлені на рис. 4.

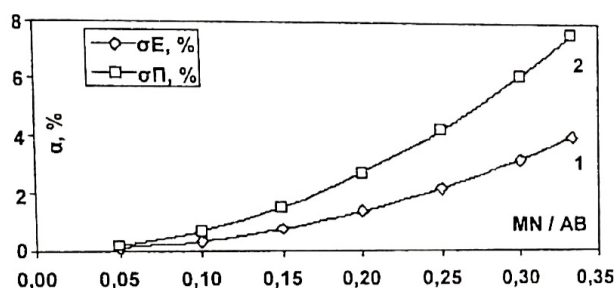


Рис. 4. Графіки похибок визначення напруженості поля (1) у центрі лінії AB і графік відхилення позірного опору (2) вимірюваного ідеальною градієнт- та симетричною чотириелектродною установкою при різних розмірах приймальної лінії (установка розміщена на тонкому провідному шарі)

Як свідчать результати розрахунків відхилення вимірної напруженості поля від її дійсного значення при розмірах приймальної лінії $MN/AB < 1/3$ не перевищує

4 %, а відхилення позірного опору – 7,5 %. До речі, на рис. 3, в залежності відхилень позірного опору, вимірюваного на поверхні двошарового розрізу з ізолюючою основою ($\rho_2 = \infty$), від його теоретичного значення на асимптотично великих відношеннях AB/h виходять на асимптоти, що визначаються графіком 2 рис. 4. Це, із принципового погляду, є логічним і свідчить про вірність розрахунків.

Висновки. Підбиваючи підсумок виконаних досліджень, сформулюємо певні висновки.

Геометрія установки та структура геоелектричного розрізу можуть суттєво впливати на значення вимірюваного позірного опору.

Значно більший вплив на невідповідність вимірюваного позірного опору його теоретичному значенню мають високопровідні горизонти в розрізі, аніж слабопровідні.

Перехід від вимірювання ρ_n із застосуванням приймальної лінії MN малих розмірів до більших (у точках перекриття) може давати суттєво відмінний результат навіть за відсутності горизонтальних неоднорідностей у розрізі. Особливо це може бути відчутним, коли в структурі розрізу є проміжні високопровідні горизонти.

Враховуючи результати виконаного аналізу і підвищені вимоги до точності робіт при виконанні мікроелектрондування необхідно методичну вимогу щодо розмірів приймальної лінії MN зробити більш жорсткою, а саме $MN \leq 0,22AB$.

Точність дослідження методом МЕЗ можна підвищити шляхом розробки програми автоматизованої кількісної інтерпретації експериментальних даних, основу якої становить оператор розв'язку прямої задачі МЕЗ для установок AMNB з урахуванням розмірів приймальної лінії MN.

1. Вижва С.А. Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. – К., 2004.
2. Онищук І.І. Геоелектричне вивчення підтоплення центральної частини Національного комплексу "Експоцентр України" // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2002. – № 21. – С. 61–63.
3. Онищук І.І. Застосування екогеофізичних досліджень при вивченні підтоплення ґрунтів // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2001. – Вип. 20. – С. 67–70.
4. Онищук І.І., Рева М.В. Принципи геофізичного картування стану земель // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2004. – № 29–30. – С. 36–40.
5. Электрическое зондирование геологической среды / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. – М., 1988. – Ч. 1. 6. Якубовский Ю.В., Репард И.В. Электроразведка. – М., 1991.

Надійшла до редколегії 14.01.06

ГЕОІНФОРМАТИКА

УДК 552.122:552.164:552/321

Г. Павлов, канд. геол.-мінералог. наук,
Ф. Індутний, студ., А. Індутний, студ., С. Філіпов, студ.

3D МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Розглянуто низку проблем, що стосуються захоплення та цифрового аналізу структур гірських порід у геології. Наведено порівняння точності методу паралельного сточування з іншими широкоживаними методиками, такими, як рентгенівською та мікромомографією. Здобутки в цих галузях дозволяють отримувати якісні растрові та триангульовані (real-time) моделі структур гранітів. Окрім того, розглянуто дію розробленого математичного апарату, за допомогою якого проводяться виміри анізотропії середовища та накопичення статистичних даних, отриманих із аналізу 3d-зображення структури.

The peculiarities of the capture and digital analysis of structures of the rocks in geology are discussed in this article. Comparison by precision of parallel slicing with other widely used methods like X-RAY tomography and μ CT is mentioned here. Achievements in these industries allow getting high-quality rasters and triangulated (real-time) models of structures of granites. Moreover, self-developed mathematical algorithm is applied to the problem of measurement of anisotropy of environment. By using such algorithm it becomes possible to collect statistical information from the analysis of 3d-image of structure.

Постановка проблеми. У геології для вирішення нагальних питань генезису гірських порід все ширшого застосування набувають цифрові методи моделювання та аналізу як плоских, так і просторових структурно-текстурних характеристик гірських порід. Донедавна схожі дослідження застосовувалися переважно тільки в

медицині та біології [SkyScan, Belgium, 2004]. Але вже на сьогодні широко використовується сейсмічна томографія для пошуку та розвідки нафти та газу, а також при інтерпретації геологічних подій у зонах підвищеної тектонічної й вулканічної активностей [3]. Останнім часом також з'явилася можливість просторового моделю-

вання і петрографічних характеристик порід, які виражаються через структурні та текстурні параметри. Вивчаючи такі моделі можна легко досліджувати пористість, тріщинуватість, просторове положення агрегатів мінералів та інші текстурні особливості порід, а також використовувати ці технології для кількісної оцінки анізотропії мінеральних агрегатів за аналогією до опису оптичних індикатрис мінералів, їх просторової орієнтації. Можливо також використовувати технології *real-time* для візуального вивчення структури.

Мікромасштабні структури можна вивчати методами стандартної рентгенівської томографії (X-Ray tomography). Цими методами отримують стопу паралельних зрізів об'єкту без його руйнації шляхом цифрового перетворення ряду кутових рентгенівських знімків в об'ємне зображення. Роздільна здатність цього методу в більшості випадків досягає 3 мм/піксель. Окремим видом цього аналізу є мікротомографія (μ СТ), роздільна здатність якої досягає 100 нм/піксель. Останнім часом цей вид аналізу набуває поряд із іншими видами мікроскопії все ширшого розповсюдження і в геології, як недорогий, експресний та неdestructивний.

Загалом означені методи спрямовані на роботу з 3d-даними, на аналіз та візуалізацію об'ємних растрів розподілу мінералів, пор, шпарин та тріщин у породі, а також інших петрографічних характеристик, тому їх можна назвати "петротомографією".

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним із методів 3d-моделювання, що є дуже молодим і ще не набув широкого застосування, є FIB-нанотомографія (дослівно від FIB – Focused Ion Beam nanotomography). При означених дослідженнях зразок опромінюється двома пучками (іонним і електронним), які сфокусовані в одній точці і нахилені під різними кутами. Іонний пучок стравлює шар за шаром із грані зразка як мікроніж, а електронним пучком цей зріз фотографується. І хоча метод є destructивним, проте роздільна здатність отриманого 3d-растру досягає 20 нм/воксель [5].

Також destructивним і достатньо трудомістким методом є безпосереднє стравлювання або сточування зразка з одночасним фотографуванням. Його роздільна здатність зазвичай становить в кращому випадку 500 μ м/воксель [5].

Цифрова обробка фотографії на сьогодні набула надзвичайно широкого розповсюдження з моменту виходу в світ першого Adobe Photoshop. У світі вже налічується сотні тисяч опублікованих праць, присвячених обробці зображень, а в 1996 р. вийшов підручник світового значення [4]. Проте, з обробкою 3d-растрів справи обстоять гірше. Модель даних у цьому варіанті складена з елементарних "об'ємних пікселів" – вокселів (voxels), але сьогоднішній рівень розвитку програмного забезпечення й обчислювальної техніки не дозволяє вільно в реальному часі працювати навіть з растром детальною 500 x 500 x 500 вокселів.

Якщо технічне та програмне забезпечення 3d-методів досліджень більш-менш вирішується, то питання кількісного аналізу об'ємних моделей структур мінеральних агрегатів залишається повністю невирішеним, оскільки всі дослідження структур мінеральних агрегатів та закономірностей процесів структуроутворення, що проводилися останнім часом, стосувалися лише 2d-моделей [1]. І тільки незначна кількість наукових робіт присвячена питанням аналізу об'ємних растрів гірських порід.

Метою роботи, що презентується статтею, є розробка методики кількісного аналізу структури та текстури мінеральних агрегатів, використовуючи 3d-моделювання для визначення та оцінки параметрів їх анізотропії.

Результати дослідження. Для отримання реальної 3d-моделі структури зразок гірської породи спочатку сточувався на планшайбі з одночасним фотографуванням для отримання стосу паралельних зображень. Після цього відбудовується тривимірна фотореалістична кольорова копія внутрішньої структури речовини з детальною по напрямках x та y до 0,02 мм/піксель, а по напрямку z – до 0,4 мм/піксель. Така роздільна здатність ставить методику на рівень точності аналізу, дещо грубішою за μ СТ (рентгенівська мікротомографія), яка у свою чергу забезпечує роздільну здатність до 0,0001 мм/воксель. Якість виконання моделі структури гірської породи у вихідному стані становить близько 300 x 300 x 40 вокселів, а роздільна здатність перетвореної для візуалізації окремих фаз модель складається з трикутників. Їх середній вміст досягає приблизно мільйона трикутників і залежить від детальної структури. Відтворення тривимірних моделей відбувається за допомогою демонстраційних версій програмних продуктів TGS.

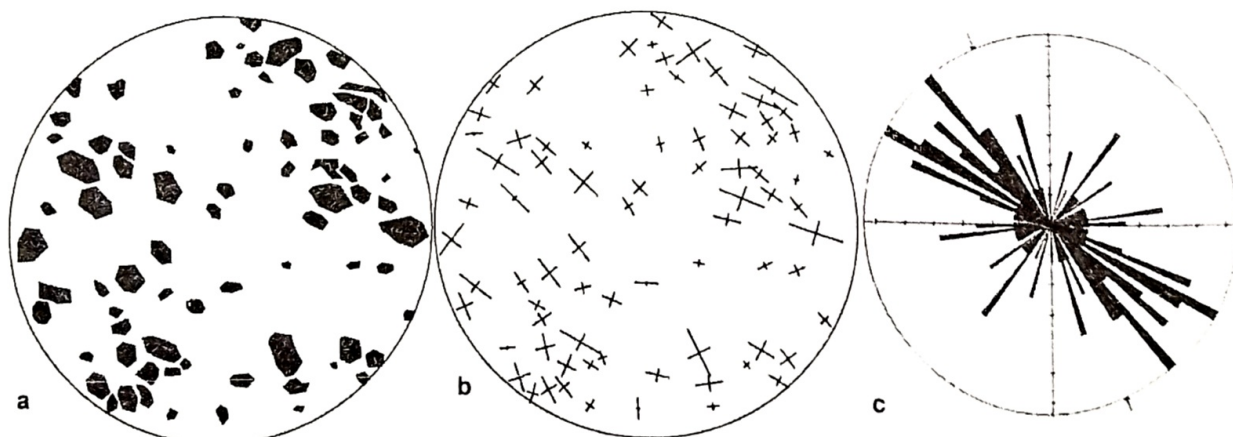


Рис. 1. Результати вимірювання анізотропії зерен кварцу в етикінському амазонітовому граніті:
а – бінарне зображення зерен кварцу, б – результат вимірювання анізотропії зерен у площині осей L_1 , L_2 ,
с – роза-діаграма орієнтації осей L_1 зерен кварцу

Написана авторами на Visual Basic програма дозволила вести статистичні підрахунки частинок, якими складено породу. Якщо об'єкти, якими формується структура (наприклад, порфіробласти, секретії, окремі пори, шпарини, бульки), не сполучені між собою, тоді

шляхом автоматизованих алгоритмів набирається статистика їх геометричних параметрів, а саме – вимірюється об'єм, подовження, просторові розміри окремої частинки та просторова орієнтація. Слід зазначити, що розроблена методика краще спрацьовує для плоских

зображень. У таких випадках алгоритм розглядає плоске зображення як об'єм товщиною по z -напрямку в 1 воксель (звісно із використанням відповідних поправок при перерахунках). Таким чином, алгоритм є універсальним і залежить лише від якості отримання вихідних даних. За допомогою зазначеної програми стопа паралельних зображень спочатку досліджується на предмет кількості несполучених частинок. Далі можливі два варіанти опрацювання моделі. Якщо гірська порода складена контрастними несполученими частинками (наприклад, етикінський амазонітовий граніт на рис. 1, а), то для кожної частинки вимірюється об'єм із побудовою гістограми його розподілу. У другому варіанті алгоритм дозволяє автоматично вимірювати характер анізотропії форм зерен через визначення довжин осей вписаних у зерна еліпсоїдів (рис. 1, б). Для цього програма шукає центр і довгу вісь L_g кожного зерна, після чого відшукуються і вимірюються інші дві взаємно

перпендикулярні вісі L_m і L_p (у разі двовимірного зображення тільки L_p).

Загальний рисунок структури породи, виражений через анізотропію всіх зерен, можна побачити шляхом автоматичного винесення всіх осей L_g або L_g/L_p для двовимірного зображення на розу-діаграму (рис. 1, с) або на стереографічну проекцію Вульфа. Таким чином стає можливим не тільки кількісне вимірювання анізотропії гірської породи, але й визначення її характеру.

Якщо фаза, що формує структуру породи або її частини, є цілісною, можливе застосування іншого алгоритму. Спочатку бінарне об'ємне зображення піддається дії фільтру EDM (Euclidian Distance Map) та UEP (Ultimate Eroded Points), що дозволяє виявити центри структуроутворювальних елементів, навіть якщо вони фізично сполучені і немає контрастної границі між ними. Надалі всі центри сполучаються прямими лініями у "скелет" гірської породи (дещо схоже на павутиння) (рис. 2, а).

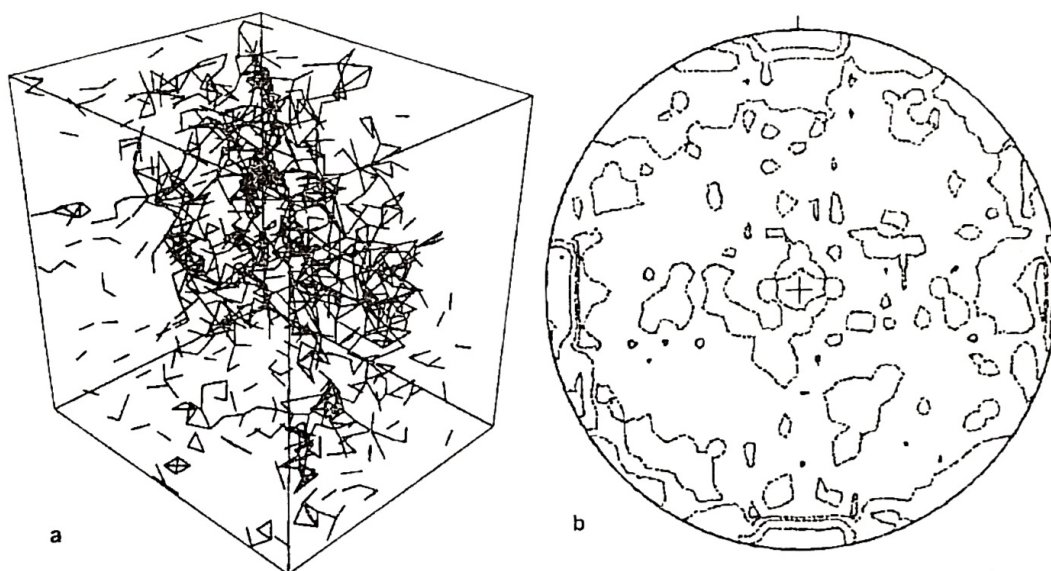


Рис. 2. Результати дослідження структури корнінських гранітів: а – скелетний вигляд розподілу біотитової фази корнінського граніту (об'ємна реконструкція, розмір зразка – 26 x 23 x 27 мм), б – стереографічна проекція ліній скелету біотитової фази (в ізолінях)

Оскільки кожна лінія скелету є параметрично визначеною, то при загальному винесенні на стереографічну проекцію стає можливим спостереження загальної картини анізотропії структури (рис. 2, б). Подібні експерименти з автоматичного визначення характеру анізотропії проводились і раніше (Davidson C., 2004 р.), але стосувалися виключно плоского зображення.

Після виконання описаного аналізу, враховуючи петрографічні дані, визначаються головні напрямки просторової орієнтації окремих мінеральних фаз гірської породи та її структурних елементів у цілому, що може бути важливим для визначення генезису й особливостей деформації гірських порід, які знайшли своє відображення у структурних особливостях.

Висновки та перспективи подальших розробок у даному напрямі.

Уперше в Україні здійснено спробу 3d-моделювання реальних структур гірських порід. Розроблений математичний апарат дозволив на прикладі амазонітових гранітів провести виміри анізотропії орієнтації подовжених кристалів кварцу, а також статистично обробити дані, отримані за аналізом 3d-зображення структури корнінських гранітів. Розроблена методика дозволяє візуалізувати картину об'ємного розподілу окремих мінералів при вивченні реальних порід, провести систематизацію

структур і кількісно описати анізотропію у вигляді "структурних еліпсоїдів" гірських порід. Отримані дані можуть бути використані при інтерпретації результатів петрофізичних досліджень. При виробництві облицювальних матеріалів ця методика може застосовуватися для напівавтоматичного визначення напрямів розпилювання блоків кристалічних порід з необхідним структурним малюнком.

3d-моделювання структур гірських порід може стати невід'ємною частиною навчального процесу для покращення сприйняття студентами особливостей просторового розміщення мінералів у гірських породах, законів кристалізації мінералів із розплавів та для формування їх уявлення про симетрію середовища кристалізації.

1. Гульбин Ю.Л. Методы количественного анализа и моделирование структуры минеральных агрегатов. – СПб., 2004.
2. Индустный Ф.В., Филипов С.В. Цифровая обработка 3d структуры горной породы // Математические исследования в кристаллографии, минералогии и петрографии: Труды Всерос. науч. школы, 3–7 октября 2005 г. – Апатиты, 2005. – С. 203–210.
3. Короновский Н.В. Сейсмическая томография. – М., 2000.
4. Russ J.C. The Image Processing and Analysis Cookbook // A Hands-on Companion Tutorial using Photoshop-compatible Plug-ins. Asheville, NC 28801. – 2002.
5. The High-Resolution X-ray Computed Tomography Facility at the University of Texas at Austin (UTCT) / www.ctlab.geo.utexas.edu. – 2003.

Надійшла до редакції 24.05.06