

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.837

М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, І. Онищук, канд. геол. наук

ПРО ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ ПОЛЬОВИХ УСТАНОВОК МІКРОЕЛЕКТРОЗОНДУВАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ГЕОЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Наведено результати розрахунків впливу геометричних параметрів польових установок мікроелектрозондування та рекомендації по забезпеченню їх оптимальних розмірів.

The result of calculations of the geometric parameters influence of the microelectrosounding and recommendations for their optimal sizes.

Вступ. Мікрогеофізичні дослідження при вивченні геоекологічного стану довкілля дають досить широкую інформацію, що дозволяє побудову об'ємних геолого-геофізичних моделей типових зон техногенного забруднення при порівняно незначних матеріальних затратах.

Вирішення задач геоекологічних досліджень вимагає нестандартних підходів до методики польових робіт, обробки та інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень, застосування нових методів і методик. Тому для геофізичного картування верхньої частини розрізу (ВЧР) необхідно застосовувати спеціальні методики, в основі яких лежить принцип погоризонтного вивчення верхньої частини розрізу [1–4].

Методика стандартних польових геоелектричних досліджень та інтерпретації даних вимагають модифікації та значної адаптації їх до задач вивчення ВЧР, а також врахування цілого ряду факторів, пов'язаних з геометрією мікроустановок.

Згідно з діючими методичними рекомендаціями, при виконанні вертикальних електричних зондувань (ВЕЗ) розмір приймальної лінії $MN \leq 1/3 AB$. Це пов'язано з тим, що в середній третині лінії AB відмічається відносна однорідність електричного поля, а отже мінімальна похибка вимірювання його напруженості E_x . З нашого погляду, для підвищення точності отримання кривих ВЕЗ (особливо при мікроелектрозондуваннях) необхідно до цього переглянути вказану методичну вимогу з метою більшої відповідності експериментальних і теоретичних кривих мікроелектрозондувань (МЕЗ). Для цього виконаємо дослідження визначення напруженості електричного поля E_x від розмірів приймальної лінії MN .

Виклад основного матеріалу.

Однорідний напівпростір. Вимірювана різниця потенціалів ΔU електричного поля лінії AB , заземленої на поверхні однорідного напівпростору з питомими опором ρ , визначається:

$$\Delta U = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right], \quad (1)$$

або, зважаючи на симетрію установки $AMNB$ ($AM = BN$, $AN = BM$)

$$\Delta U = \frac{I\rho}{\pi} \cdot \frac{MN}{AM \cdot AN}. \quad (2)$$

Наближене значення напруженості електричного поля $\tilde{E}_x$ отримаємо у вигляді:

$$\tilde{E}_x = \Delta U / MN = \frac{I\rho}{\pi} \cdot \frac{1}{AM \cdot AN} = \frac{I\rho}{\pi} \cdot \frac{1}{(AB/2)^2 - (MN/2)^2}. \quad (3)$$

Точне значення напруженості електричного поля E_x в центрі заземленої лінії AB , відповідно до (3), у якому $MN \rightarrow 0$, виразиться через рівняння:

$$E_x = \frac{I\rho}{\pi (AB/2)^2}. \quad (4)$$

Похибку δ відхилення наближеного значення $\tilde{E}_x$ від його точного значення E_x подамо у вигляді:

$$\delta = \frac{\tilde{E}_x - E_x}{E_x} \cdot 100\% = \frac{(MN/AB)^2}{1 - (MN/AB)^2} \cdot 100\%. \quad (5)$$

На рис. 1 наведено графік залежності похибки визначення напруженості поля E_x від відношення розмірів приймальної лінії MN до розміру лінії живлення AB .

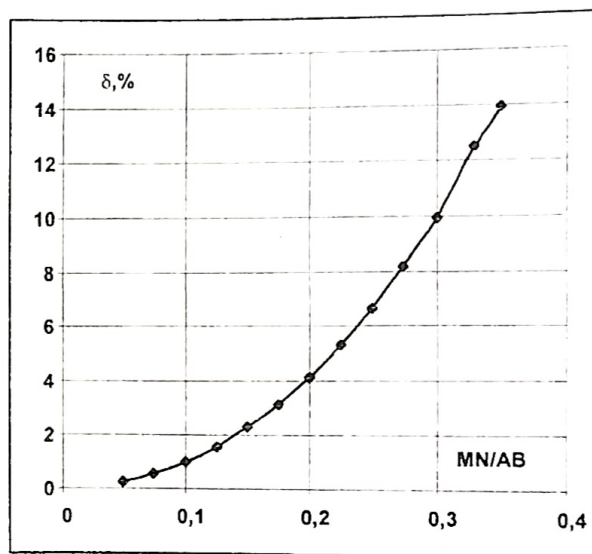


Рис. 1. Залежність похибки δ виміру напруженості електричного поля від відношення MN / AB

Аналіз результатів розрахунків свідчить, що для забезпечення точності вимірювання напруженості електричного поля в межах $\delta < 5\%$ необхідно, щоб розмір приймальної лінії MN не перевищував $0,22 AB$. Тобто $MN < 0,22 AB$. Отже, при початкових розносах $AB/2 = 0,3$ м, які зазвичай використовуються при мікроелектрозондуваннях, необхідно брати розмір приймальної лінії $MN/2 < 6,5$ см. Такі мікрозондування на початкових малих розносах вимагають досить скрупульозного підходу щодо витримування геометрії установок та облаштування заземлень.

Двошаровий розріз. Безперечно, що модель однорідного напівпростору не може бути використана для оцінки похибок вимірювань позірною опором ρ_p , оскільки він завжди (незалежно від типу і геометрії установок) відповідатиме дійсному питомому опором напівпростору. Для вирішення цієї задачі раціонально обмежитися відносно простою, але в той же час і оптимальною для досягнення цієї мети моделлю двошарового геоелектричного розрізу, де найвиразніше проявляється вплив другого горизонту на структуру й однорідність електричного поля. Видається, що оцінки похибок вимірювань ρ_p на основі цієї моделі є мажорантними порівняно з багато-

шаровими моделями, в яких взаємовплив горизонтів може суттєво зменшувати ефект неоднорідності горизонтальної компоненти електричного поля.

Припустимо, що на поверхні двошарового розрізу з питомими опорами першого та другого горизонтів ρ_1 і ρ_2 і потужністю першого горизонту h заземлена лінія АВ, у центрі якої вимірюється різниця потенціалів ΔU вимірювальною лінією MN. Відомо [5], що потенціал

поля точкового джерела сили I на поверхні двошарового розрізу вираховується з формули:

$$U(r) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right], \quad (6)$$

де r – відстань від точкового джерела до точки виміру; $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ – коефіцієнт відбиття.

Із врахуванням цієї залежності різниця потенціалів ΔU поля лінії АВ у вимірювальній лінії MN може бути записана у вигляді:

$$\Delta U = \frac{I\rho_1}{\pi} \cdot \frac{MN}{AM \cdot AN} \left\{ 1 + 2 \frac{AM \cdot AN}{MN} \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{AM^2 + (2nh)^2}} - \frac{1}{\sqrt{AN^2 + (2nh)^2}} \right] \right\}, \quad (7)$$

або ж

$$\Delta U = \frac{I\rho_1}{\pi} \cdot \frac{4MN}{AB^2 - MN^2} \left\{ 1 + \frac{AB^2 - MN^2}{MN} \times \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{(AB - MN)^2 + (4nh)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(AB + MN)^2 + (4nh)^2}} \right] \right\}. \quad (8)$$

Наближене значення горизонтальної компоненти напруженості електричного поля $\tilde{E}$ в центрі лінії АВ отримаємо

$$\tilde{E} = \frac{\Delta U}{MN} = \frac{I\rho_1}{\pi} \cdot \frac{4}{AB^2 - MN^2} \left\{ 1 + \frac{AB^2 - MN^2}{MN} \times \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{(AB - MN)^2 + (4nh)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(AB + MN)^2 + (4nh)^2}} \right] \right\}. \quad (9)$$

Точне значення напруженості E отримаємо шляхом спрямування $MN \rightarrow 0$ у попередньому співвідношенні:

$$E = \lim_{MN \rightarrow 0} \tilde{E} = \frac{I\rho_1}{\pi} \cdot \frac{4}{AB^2} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[1 + (4nh/AB)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (10)$$

Відхилення реально вимірюваної напруженості електричного поля $\tilde{E}$ від її теоретичного еталону E визначимо у вигляді:

$$\delta_E = (\tilde{E}/E - 1) \cdot 100\% = \left\{ \frac{\frac{1}{1-\xi^2} + \frac{1}{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{(1-\xi)^2 + (4nh/AB)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(1+\xi)^2 + (4nh/AB)^2}} \right]}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[1 + (4nh/AB)^2]^{3/2}}} - 1 \right\} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де $\xi = MN/AB$ – відносний розмір приймальної лінії.

Визначимо також позірний опір ρ_n , що вимірюється реальною електричною установкою АМNB:

$$\rho_n = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta U}{I} = \pi \frac{AB^2 - MN^2}{4MN} \cdot \frac{\Delta U}{I} = \rho_1 \left\{ 1 + \frac{1-\xi^2}{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{(1-\xi)^2 + (4nh/AB)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(1+\xi)^2 + (4nh/AB)^2}} \right] \right\}. \quad (12)$$

Теоретичне значення позірного опору ρ_n^T відоме [6], а також може бути отримане із (10):

$$\rho_n^T = \frac{1}{4} \pi AB^2 \cdot \frac{E}{I} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[1 + (4nh/AB)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (13)$$

Відношення δ_n позірного опору ρ_n від його еталону ρ_n^T , виражене у відсотках, визначається:

$$\delta_n = (\rho_n / \rho_n^T - 1) \cdot 100\% = \left\{ \frac{1 + \frac{1-\xi^2}{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{(1-\xi)^2 + (4nh/AB)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(1+\xi)^2 + (4nh/AB)^2}} \right]}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[1 + (4nh/AB)^2]^{3/2}}} - 1 \right\} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Для аналізу закономірностей і встановлення можливих меж похибок вимірювання напруженості поля δ_E і позірного опору δ_n були виконані відповідні розрахунки цих похибок для двох протилежних випадків двошарового розрізу: $\rho_2/\rho_1 = 1/8$ і $\rho_2/\rho_1 = 8$.

Розрахунки виконувалися для різних розмірів лінії живлення АВ (розмір виражався по відношенню до потужності першого горизонту) та п'яти відносних розмірів приймальної лінії MN, а саме $MN/AB = 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 1/3$. Графіки відповідних залежностей представлені на рис. 2 (а, б, в).

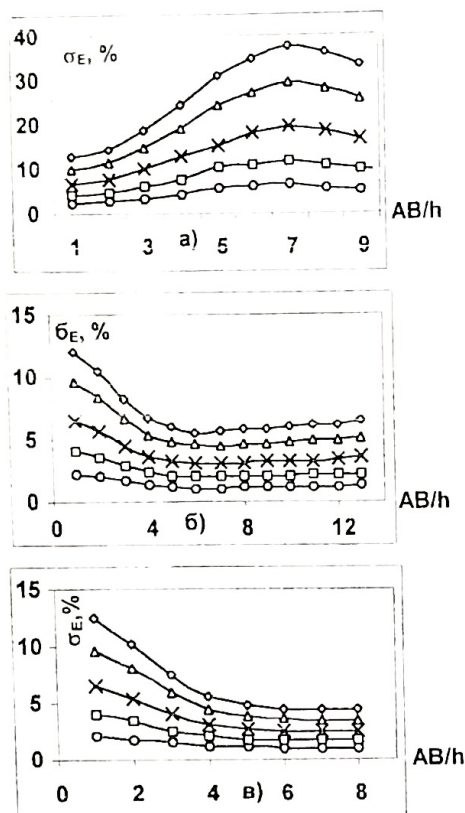


Рис. 2. Графіки похибок визначення напруженості електричного поля лінії АВ, заземленої на поверхні двохшарового розрізу при різних співвідношеннях ліній живлення та прийому (шифри кривих – значення MN/AB): а – $\rho_2/\rho_1 = 1/8$; б – $\rho_2/\rho_1 = 8$; в – $\rho_2 = \infty$
Умовні позначки: 1 – $\circ$ – (0,15); 2 – $\square$ – (0,2); 3 – $\times$ – (0,25); 4 – Δ – (0,3); 5 – $\diamond$ – (1/3)

Аналіз відмінностей реально виміряної напруженості електричного поля в центрі лінії АВ за допомогою приймальної лінії MN кінцевих розмірів від її теоретичного значення (рис. 2, 3, 4) свідчить про те, що наявність провідного горизонту суттєво впливає на величину реально вимірюваної напруженості.

Так, на розносах $AB/h = 7$ над розрізом $\rho_2/\rho_1 = 1/8$ напруженість поля, виміряна навіть лінією MN малих розмірів ($MN/AB = 0,15$), дає похибку від дійсного значення на 6,5 %. При застосуванні приймальної лінії MN, що відповідає гранично допустимій величині $MN/AB = 1/3$, ця відмінність досягає 38 %. У той же час для розрізів $\rho_2/\rho_1 = 8$ це відхилення суттєво менше, що свідчить про наявність значно більшої однорідності електричного поля в центральній частині лінії живлення АВ за рахунок екрануючих (відбиваючих) властивостей слабопровідного горизонту. На малих розносах як для моделі з $\rho_2 < \rho_1$, так і $\rho_2 > \rho_1$ відхилення виміряної напруженості електричного поля від її теоретичного значення практично таке саме, як і для випадку однорідного напівпростору, розглянутого вище.

Особливий інтерес, безперечно, викликає аналіз відхилень позірних опорів $r_{\text{пл}}$, що вимірюється симетричною чотириелектродною установкою АМNB, від теоретичних значень цього ж опору $r_{\text{п}}^T$, виміряного ідеальною градієнт-установкою (ці значення використовуються при інтерпретації кривих МЕЗ методом підбору). Результати відповідних розрахунків представлено на рис. 3.

Іх аналіз свідчить про, знову ж таки, більш суттєвий вплив на значення $r_{\text{пл}}$, виміряні при застосуванні лінії MN різних розмірів, наявності провідного горизонту. Так, для розрізу з $\rho_2/\rho_1 = 1/8$ відхилення позірних опо-

ру від його теоретичного значення на розносах $AB/h = 7$ при розмірі приймальної лінії $MN = 0,15AB$ становить близько 4 %, а при розмірах $MN = 1/3AB$ – 22 %. Неважко оцінити можливі "ворота" кривої позірної опору при переході з лінії $MN = 0,2 AB$ на $MN = 1/3AB$. Таке розходження може становити близько 15–17 % (без наявності горизонтальних неоднорідностей), з якими, зазвичай, пов'язують присутність "воріт". За наявності в розрізі слабопровідного горизонту (у нашому випадку $\rho_2 = 8\rho_1$) відхилення виміряного значення позірних опорів від його теоретичного значення менше і становить у межах від 1 до 6 %, а для розрізу з $\rho_2 = \infty$ – до 7–7,5 %.

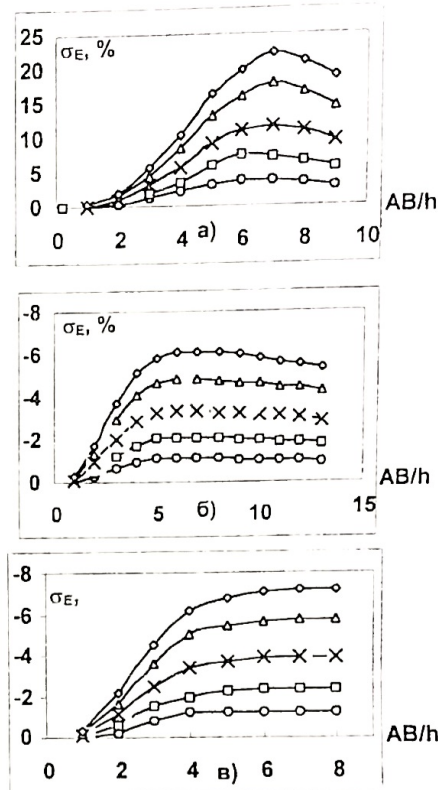


Рис. 3. Залежності відхилення позірних опорів, виміряних ідеальною градієнт- та реальною симетричною установкою АМNB напруженості електричного поля і позірних опорів від їх теоретичних значень для однополюсної градієнт-установки у випадку, коли установки розташовуються на поверхні тонкого провідного шару з повздовжньою провідністю S. У цій ситуації виміряне падіння напруги в приймальній лінії MN вираховується за формулою:

$$\Delta U = \frac{I}{\pi S} \cdot \ln \frac{1 + MN/AB}{1 - MN/AB}, \quad (15)$$

відповідно виміряна напруженість $E_x = \Delta U / MN$. Її дійсне теоретичне значення E_x^T у центрі лінії АВ має вигляд

$$E_x^T = \frac{I}{\pi S} \cdot \frac{1}{AB/2}. \quad (16)$$

Відхилення $\delta_E = (E_x / E_x^T - 1) \cdot 100\%$ визначиться:

$$\delta_E = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{(MN/AB)} \cdot \ln \frac{1 + MN/AB}{1 - MN/AB} - 1 \right] \cdot 100\%. \quad (17)$$

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.

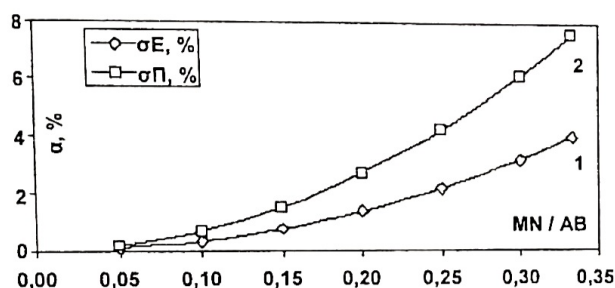


Рис. 4. Графіки похибок визначення напруженості поля (1) у центрі лінії AB і графік відхилення позірного опору (2) вимірюваного ідеальною градієнт- та симетричною чотириелектродною установкою при різних розмірах приймальної лінії (установка розміщена на тонкому провідному шарі)

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-