

В.О. Назаренко, к.т.н., доц.
Національний гірничий університет

ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ГЕОМЕТРИЗАЦІЇ ЗРУШЕННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД І ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ З ПОЗИЦІЙ ТЕОРІЇ ПОЛЯ

(Представлено д.т.н., проф. Бакка М.Т.)

Зрушення гірських порід і земної поверхні над очисною виробкою розглядається з позицій векторного аналізу, на підставі чого робиться висновок, що підроблювана область породного масиву являє собою скалярне поле. Це дає підстави для вивчення процесу зрушення шляхом його геометризації з використанням методу ізоліній, який базується на теорії геохімічного поля.

При підземній розробці вугільних пластів у випадках, коли відроблені ділянки мають такі розміри, що склепіння над відробленим простором руйнується, зрушення основної покрівлі над очисною виробкою розповсюджуються і на верхні шари гірських порід. При осіданні нижніх шарів покрівлі її верхні шари втрачають опору і починають опускатися під дією своєї ваги і зовнішніх навантажень та спираються на шари, які вже осіли. В результаті процес осідання швидко розповсюджується від одного шару до іншого до земної поверхні.

Точки породного масиву і земної поверхні у часі і у просторі переміщуються кожна за своєю траєкторією. Траєкторії руху точок залежать від багатьох факторів. З результатів натурних спостережень за зрушенням земної поверхні на шахті № 5 Щокінського району [1] видно (рис. 1, а), що вектори зрушення точок поверхні спрямовані до якогось центра, який безперервно переміщується вслід за очисним вибоєм, але залишається на певній відстані від нього. Складові траєкторій в площині, що перпендикулярна до напрямку руху вибою, показані на рис. 1, б. Складові траєкторії переміщення точок поверхні у горизонтальній площині дуже різноманітні. У загальному вигляді вони можуть бути представлені на рис. 1, в, де зображені траєкторії у горизонтальній площині для двох точок земної поверхні, які розташовані поряд із точкою № 16 (рис. 1, а) над серединами сусідніх лав.

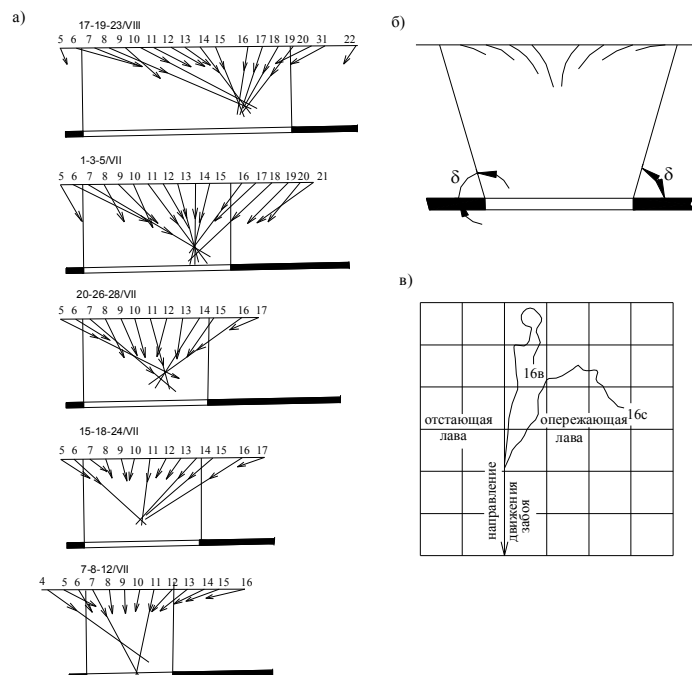


Рис. 1. Складові векторів зрушення реперів спостережної станції шахти № 5: а) у напрямі руху очисного вибою на різні дати спостережень; б) у площині, що перпендикулярна руху очисного вибою; в) у горизонтальній площині

Наведені дані вказують, що траєкторії переміщення точок земної поверхні при інших однакових умовах залежать від розташування точок відносно границь виробки і розмірів вийманого поля, які є функцією часу і швидкості руху очисного вибою.

Положення точок земної поверхні над рухомим очисним вибоєм у кожний момент часу t характери-

зується координатами x , y і z . З точки зору векторного аналізу [2], якщо кожному значенню скалярного аргументу t покласти у відповідність вектор $r(t)$, то $r(t)$ називається векторною функцією скалярного аргументу t . Якщо початок вектора $r(t)$ (радіус-вектора) помістити у постійну точку O , кінець радіус-вектора $r(t)$ опише просторову криву. Якщо t означає час, то $r(t)$ описує траєкторію руху матеріальної точки (рис. 2, а). Радіус-вектор $r(t)$ розкладається по базових векторах i, j, k прямокутної декартової системи координат:

$$r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k,$$

де компоненти $x(t), y(t), z(t)$ є функцією від t .

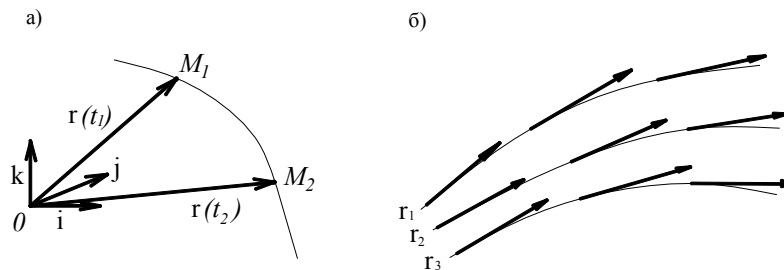


Рис. 2. Траєкторія руху матеріальної точки, яка описується векторною функцією скалярного аргументу (а) і фрагмент векторного поля (б)

За такою ж схемою при вивченні зрушення земної поверхні вектор зрушення точки розкладається на складові: вертикальну – вертикальне зрушення (осідання) η і горизонтальну – горизонтальне зрушення ζ . Горизонтальне зрушення в свою чергу розкладається на зрушення по простяганню ζ_x та зрушення на-вхрест простяганню ζ_y .

Зрушення гірських порід починається безпосередньо біля відробленого простору, проходить повз усю покриваючу товщу і закінчується на земній поверхні. Переміщення окремих точок, блоків і ділянок гірських порід, що охоплені зрушенням, відбувається не хаотично. Ці переміщення підпорядковані певним закономірностям. Будь-яка частка при переміщенні має у кожний момент часу певну швидкість як за величиною, так і за напрямом (її переміщення у кожний момент часу здійснюється за деяким вектором) і пов'язана зі всією масою рухомих порід.

Аналітичний опис переміщень окремих точок масиву можливий, як було показано вище, за допомогою векторної функції скалярного аргументу або графічно за результатами періодичних вимірювань переміщень підроблюваних точок (рис. 1). Що стосується зрушення підроблюваних гірських порід і земної поверхні у цілому, то такі методи не використовуються.

Відомо [2], якщо кожній точці M простору кладеться у відповідність вектор V , то даний простір є векторним полем $V(M)$ (наприклад, поле швидкостей часток рухомої рідини: рис. 2, б). Аналітично воно описується векторною функцією $V=V(r)$ векторного аргументу r (r – радіус-вектор).

Теоретично зрушення гірських порід описується як векторне поле, але практично це неможливо тому, що функція $V=V(r)$ для поля зрушення не може бути визначена у явному вигляді (з причини великої кількості та мінливості факторів, що впливають на процес зрушення).

Важливою властивістю векторного поля є те, що у декартових координатах воно описується рівнянням $V=V(x, y, z)$ і складається з компонентів V_x, V_y, V_z , які утворюють три скалярних поля і однозначно визначають векторну функцію $V(r)$:

$$V(x, y, z) = V_x(x, y, z)i + V_y(x, y, z)j + V_z(x, y, z)k, \quad (1)$$

де i, j, k – одиничні вектори, паралельні відповідно осям OX, OY, OZ .

Скалярним полем $U(M)$ називається такий простір, у якому кожній точці M ставиться у відповідність скалярна величина U (наприклад, поле температури, щільності у неоднорідному середовищі). Якщо M має декартові координати (x, y, z) , то також пишуть $U = U(x, y, z)$.

Властивості скалярних полів можна наочно вивчити за допомогою поверхонь рівня. Це поверхні у просторі, на яких U має постійне значення. Вони описуються рівнянням $U = U(x, y, z) = \text{const}$. У плоскому скалярному полі $U = U(x, y)$ (U не залежить від z) лініями рівня (ізолініями) називають криві, на яких U залишається постійним. Вони описуються рівняннями $U = U(x, y) = \text{const}$ (наприклад, горизонталі на топографічних картах, ізогіпси поверхні пласта).

Описані властивості векторного і скалярного полів лежать в основі геометризації надр Землі методом ізоліній (геометризації форм, властивостей і процесів у надрах) і теорії геохімічного поля, які розроблені професором П.К. Соболевським [3]. Саме теорія геохімічного поля складає основу сучасної геометрії

надр (гірничої геометрії).

Вихідним положенням теорії геохімічного поля є повна його аналогія геофізичному полю Землі, але при цьому розглядається не все поле, а деякий обмежений об'єм простору (рис. 3). Властивості і форми матеріальної маси цього простору приймаються як умовно застигли, нерухомі. Якщо і виникають якісь зміни у часі якості гірських порід і умов їх залягання, то ці процеси протікають дуже повільно.

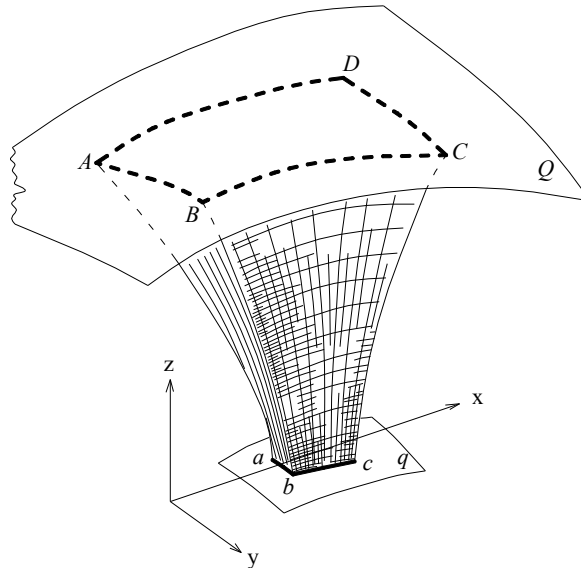


Рис. 3. Зображення моделі шарувато-струминного геохімічного поля

Джерелом геохімічного поля (як аналога геофізичного поля Землі) є центр Землі і воно розповсюджується від центра до її поверхні. Якщо розглядати таке поле, як векторне $V = V(r)$, то компоненти V_x , V_y його рівняння (1) будуть дорівнювати нулю і воно опишеться виразом $V = V_z(x, y, z)i$. У цьому випадку скалярне поле $V_z = V_z(x, y, z)$ однозначно опише векторне поле $V = V(r)$, а відповідно, і геохімічне поле.

До теперішнього часу прикладна частина геометрії надр охоплювала вивчення форми, фізико-хімічних і промислово-технічних властивостей потоків матеріальної маси. Змінювання у часі якості корисних копалин та умов їх залягання у надрах є дуже повільним і тому при вирішенні питань геометризації надр вважалось, що кількісні та якісні закономірності в часі не змінюються і задовільно геометризуються у тримірному вимірі. Але існує ряд гірничо-геологічних процесів, які неможливо репродукувати у тримірному вимірі. Так при проведенні підземних гірничих робіт та розробці родовищ глибокими кар'єрами мають місце зрушення гірських порід і земної поверхні. Вивчення цих процесів ведеться з урахуванням кількісного та якісного складу гірських порід та їх просторового переміщення у часі.

Вивчення зрушення гірських порід методами геометризації до теперішнього часу не отримало розвитку. При підробці гірських порід ми маємо потік матеріальної маси, окремі (характерні) властивості якого інтенсивно змінюються від однієї точки до іншої не тільки у просторі, а й у часі, тобто у різні моменти часу властивості потоку в одній і тій же точці відрізняються. Потік зрушення є різновидом тектонічного потоку і являє собою частину надр, що піддалась деформації в результаті виїмки корисної копалини. Причиною переміщення порід при їх підробці є вплив сил гравітації, а джерелом поля зрушення – площа виїманої корисної копалини. Якщо умовно вважати зображену на рис. 6 фігуру $ABCDabcd$ потоком зрушення, то поверхня q буде являти собою поверхню розроблюваного пласта, контур $abcd$ – границі області в площині пласта, яка впливає на земну поверхню і включає відроблений простір і зону опірному тиску навколо нього, а площа $ABCD$ – область впливу очисної виробки на земну поверхню.

Відображення зрушення гірських порід над очисною виробкою у вигляді потоку зрушення відповідає сучасному розумінню світу і природних явищ як потоку матерії, а не як механічної системи. Означимо основні положення про потік [4]:

1. Будь-який потік означає собою те чи інше співвідношення двох, і тільки двох, основних форм його – потоку поступального (потенційного), який складається зі стоків та витоків, і обертального (вихрового), що складається з вихрів лівих та правих. Стоки та витки не існують вічно, а безперервно виникають, існують, змінюючись, і припиняють своє існування тим чи іншим шляхом.

2. Усякий потік шарувато-струминний і, відповідно цьому, є можливість завжди відобразити його геометрично лініями току для струменів та ізоповерхнями – для шарів.

3. Потік поступальний у стаціонарному стані чи, точніше, у такий малий інтервал часу, що потік мо-

жна вважати незмінним, геометрично відображається системою незмінних ізоперхонь, які не перетинаються між собою, і системою незмінних ліній току по нормалях до цих ізоперхонь. Якщо поступальний потік змінюється, то відповідним чином змінюються ізоперхні і лінії току, що до нього відносяться.

4. Будь-який миттєвий переріз, не обов'язково плоский, поступального потоку, який змінюється, являє собою топографічну поверхню з її максимумами (горами, витоками) і мінімумами (низинами, стоками).

Згідно з цим положенням потік зрушення гірських порід над очисною виробкою класифікується як поступальний (потенційний) і має шарувато-струминну структуру і може бути пошарово відображений ізоперхнями. З іншого боку, потік зрушення (геохімічний потік за П.К. Соболевським) є геометричним місцем нормалей до вказаних ізоперхонь.

Якщо виразити будь-яку з характерних властивостей потоку зрушення в довільній його точці числом V , наприклад величину вертикального зміщення, то ця властивість, згідно із теорією геохімічного поля, може розглядатись як функція чотирьох змінних, тобто

$$V = f(x, y, z, t).$$

Відобразити функцію V у явному вигляді не уявляється можливим, але вона буде задовольняти таким умовам:

- 1) скінченність, тобто значення V у будь-якій точці потоку зрушення не може дорівнювати $\pm\infty$;
- 2) однозначність, тобто у конкретній точці потоку зрушення у теперішній момент часу t (момент спостереження) функція V має лише одне визначене значення;
- 3) безперервність, тобто незначне переміщення точки спостереження спричиняє відповідну незначну (кінцеву) зміну кількісної характеристики потоку зрушення (розрив щільності порід при цьому не враховується і передбачається їх плавне осідання).

Поверхні окремих перерізів потоку зрушення у різні моменти часу $t, t + \Delta t_1, t + \Delta t_2, \dots$ (моменти спостережень) являють собою топографічні поверхні, які змінюють свою конфігурацію з плином часу $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots$ від початку спостережень. Загальний вигляд топографічної поверхні в окремі моменти часу може бути описаний аналітично таким чином:

$$\begin{aligned} z &= \varphi(x, y, t); \\ z_1 &= \varphi(x, y, t + \Delta t_1); \\ z_2 &= \varphi(x, y, t + \Delta t_2); \\ &\dots\dots\dots; \\ z_n &= \varphi(x, y, t + \Delta t_n). \end{aligned}$$

Вказані топографічні поверхні зображаються ізолініями, тобто лініями однакового осідання окремих точок за моменти $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$. Краєм мульди зрушення на земній поверхні буде ізолінія з відміткою нуль або іншою відміткою, яка прийнята умовно за нуль.

Маючи топографічні поверхні перерізів потоку зрушення на окремі моменти часу (моменти спостережень), можна наочно відобразити методом ізоліній властивості потоку, які нас цікавлять – характер і величину охоплення зрушенням земної поверхні, а на основі співставлення цих поверхонь – робити висновки про зміну мульди зрушення у часі, тобто про процес зрушення земної поверхні.

Особливе значення при вивченні та аналізі зрушень і деформацій земної поверхні над очисною виробкою отримують положення теорії геохімічного поля П.К. Соболевського щодо математичних дій з топографічними поверхнями [3]. Це пов'язано з тим, що зрушення і деформації поверхні мульди взаємно інтегруються та диференціюються [1]. На цій властивості основана більшість відомих способів розрахунку зрушень і деформацій земної поверхні.

Розглянемо основні принципи диференціювання поверхонь, які представлені ізолініями рівня.

Візьмемо похідну від топографічної поверхні $z = \varphi(x, y)$, яка є горизонтальним перерізом геохімічного поля $V = V(x, y, z)$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x, y) \\ \frac{\partial z}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \varphi(x, y) \end{aligned} \right\}$$

Похідна $\frac{\partial z}{\partial x}$, очевидно, є тангенсом кута, яка дотична, що проведена у даній точці $M(x, y, z)$ топопо-

верхні і лежить у площині ZOX , складає із горизонтальною площиною ZOY . Похідна $\frac{\partial z}{\partial y}$ відповідно відноситься до тангенса кута, який лежить у площині ZOY . Кожен з цих тангенсів є мірою ступеня підвищення або ступеня падіння топографічної поверхні за напрямом осей OX і OY . Ці похідні прийнято називати градієнтом топографічної поверхні, до того ж азимут напрямку, в якому може бути визначений цей градієнт, взагалі може бути довільний. З усіх можливих напрямів визначення градієнта топографічної поверхні особливу увагу викликає той напрям, у якому цей градієнт досягає найбільшого значення. Це – градієнт, який відповідає напрямку найбільшого скату в заданій точці поверхні. Таке максимальне значення градієнта в даній точці прийнято називати повним градієнтом. Повний градієнт має напрям нормальний до ізолінії (в просторі і на плані) (рис. 4, а).

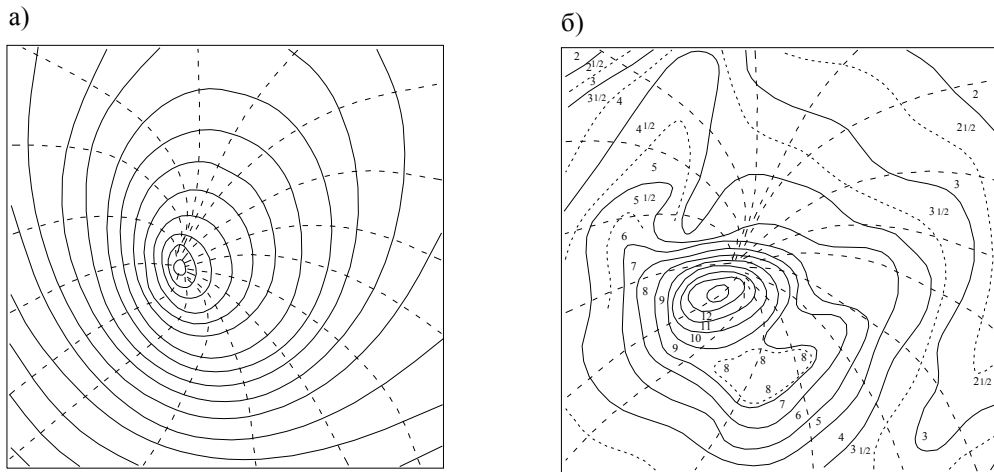


Рис. 4. Поверхня, яка диференціюється, і лінії найбільшого скату (а) та система ізоградієнтів і відповідних ліній, яка еквівалентна диференціалу топографічної поверхні (б)

Похідні $\frac{\partial z}{\partial x}$ і $\frac{\partial z}{\partial y}$, як і вихідна функція $z = \varphi(x, y)$, задовольняють усім умовам, що пред'являються до топографічних поверхонь. Таким чином для них може бути отриманий відповідний графік у відповідних ізолініях (рис. 4, а) або графік ізоградієнтів (рис. 4, б). Топографічний градієнт як величина, що має напрям, чисельне значення і є функцією точки, отже є вектор. Дві системи ізоліній – ізогіпси даної топографічної поверхні і ізоградієнти у разі їх накладання одна на другу, визначають повністю всю систему векторів градієнтів: якщо взяти на плані довільну точку, то ізогіпси першого графіка дадуть третю координату z і напрям вектора градієнта, а другий графік дасть його величину. Якщо першим графіком буде графік розподілу вертикальних зміщень точок поверхні мультди, то другий графік буде характеризувати нахил поверхні.

Враховуючи диференціальний зв'язок між нахилами та кривизною поверхні мультди зрушення таким чином може бути отриманий графік, який характеризує кривизну, як першу похідну від нахилів і як другу похідну від осувань земної поверхні.

Перехід від ізоліній до векторів здійснюється диференціюванням, а зворотний перехід – інтегруванням. Аналітично вирішити ці задачі складно навіть для цілком визначених функцій, а для функції топографічної поверхні $z = \varphi(x, y)$, яка виражена у неявному вигляді, це практично неможливо. Геометричне диференціювання та інтегрування будь-якої топографічної поверхні здійснюється вельми просто.

Викладене вище характеризує зрушення підроблених гірських порід і земної поверхні як потік матеріальної маси, який може бути вивчений на основі теорії геохімічного поля шляхом геометризації методом ізоліній. При цьому обов'язковою є така умова, що потік або поле зрушення гірських порід повинні розвиватися як процес в одному напрямі – по вертикалі. В іншому випадку поле зрушення не може бути ідентифіковане як скалярне поле і до нього не можна застосовувати положення теорії П.К. Соболевського.

Означена умова у відношенні процесу зрушення гірських порід і земної поверхні може бути виконана, якщо контури виробки і зони опірної тиску (лінія $abcd$ на рис. 3) залишаються незмінними. В ідеалі це відповідає одночасній, моментальній виїмці корисної копалини в межах контуру, а у реальних умовах – розвитку гірничих робіт в межах контуру у глибину (наприклад, при розробці потужних круто спадних покладів корисної копалини) чи закінченому зрушенню гірських порід, яке можна розглядати як

процес, що протікає з нескінченно малою швидкістю. Ілюстрацією горизонтального перерізу скалярного поля вертикальних зрушень є поверхня мульди при скінченному процесі зрушення, наприклад, мульда побудована за результатами натурних спостережень за зрушенням земної поверхні на шахті № 3 "Тентекська" [5] (рис. 5).

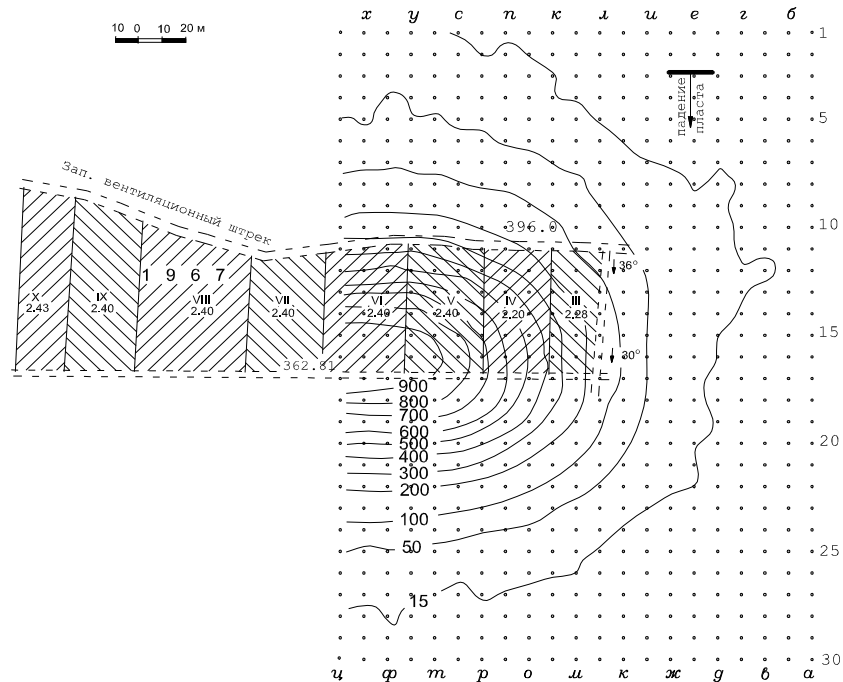


Рис. 5. Поверхня мульди зрушення на шахті № 3 "Тентекська"

ЛІТЕРАТУРА:

1. Авершин С.Г. Сдвигение горных пород при подземных разработках. – М.: Углетехиздат, 1947. – 245 с.
2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
3. Соболевский П.К. Современная горная геометрия // Геометризация месторождений минерального сырья как основа рационального освоения недр / Научн. тр. – М.: МГИ, 1969. – С. 18–63.
4. Корольков П.А. Введение в геометрию потока (геометрию процессов) // Геометризация месторождений минерального сырья как основа рационального освоения недр / Научн. тр. – М.: МГИ, 1969. – С. 188–208.
5. Земисев В.Н., Мурашов А.Н. Определение сдвижений и деформаций земной поверхности в заданной точке мульды в условиях Карагандинского угольного бассейна // Горное давление, сдвигение горных пород и методика маркшейдерских работ / ВНИМИ. – Л.: Изд. ВНИМИ, 1961. – Сб. 71. – С. 62–78.

НАЗАРЕНКО Валентин Олексійович – доцент, докторант кафедри маркшейдерії Національного гірничого університету.

Наукові інтереси:

– зрушення гірських порід і земної поверхні при розробці вугільних родовищ;

– механіка гірських порід.

Тел.: (0562) 34-55-79.

E-mail: nazar54@rambler.ru

Подано 15.10.2002

Обоснование возможности геометризации сдвижения горных пород и земной поверхности с позиций теории поля / В.А. Назаренко // Вісник ЖІТІ. – 2002. – № / Технічні науки. – С. : ил. 5. – Библиогр.: 5 назв.

Сдвижение горных пород и земной поверхности над очистной горной выработкой рассматривается с позиций векторного анализа, на основании чего делается вывод, что подработанная область породного массива представляет собой скалярное поле. Это дает возможность изучения процесса сдвижения путем его геометризации с применением метода изолиний, основанного на теории геохимического поля.

Substantiation of an opportunity of analysis of geometry of rocks and surface displacement from positions of the vector field theory / V.A. Nazarenko // Вісник ЖІТІ. – 2002. – № / Технічні науки. – Р. : ill. 5. – refs.: 5 titles.

The displacement of rocks and surface above exploitation working is considered. For that the vector analysis is applied. On the basis of it make the conclusion, that the area of a rock mass, influenced by mining, represents a scalar field. It enables to study a geometry of the displacement of rocks with use a isoline method, based on the theory of a geochemical field.