

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛЯГАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

В.І. Зацерковний, І.В. Тішаєв, О.М. Пилипенко

ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна, e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, ivantishaev@gmail.com, olena.pylypenko95@gmail.com

Розглянуто підхід до застосування матеріалів дистанційного зондування для визначення елементів залягання гірських порід. З огляду на геометричну модель, що передбачає апроксимацію поверхні нашарувань гірських порід площиною (в межах вибраного просторового околу), та на підставі матеріалів зондування можна розробити й програмно реалізувати алгоритм обрахунку необхідних елементів залягання гірських порід. На відміну від традиційного способу визначення елементів залягання гірських порід шляхом прямих вимірів у польових умовах запропоновано принципово інший підхід до розв'язання цієї задачі.

Ключові слова: матеріали дистанційного зондування, геоінформаційні системи, лінія падіння, лінія простягання, азимут падіння, азимут простягання.

Вступ. Гірські породи осадового чохла складають верхню частину земної кори у деякому просторовому положенні та мають певні форму і розміри. Найпоширенішою формою залягання осадових порід є шар чи пласт — геологічне тіло, що зазвичай характеризується однорідним літологічним складом. У будові пласта виділяють покрівлю — верхню обмежувальну поверхню, і підшву. Найкоротша відстань між ними визначає потужність шару. Положення шару в просторі визначають за елементами залягання: азимутом простягання, азимутом падіння і кутом падіння¹.

Земна кора постійно перебуває в русі. Різноманітні за формою та напрямком тектонічні рухи спричиняють порушення первинного залягання гірських порід і є основним фактором формування рельєфу земної поверхні. Тектонічні порушення поділяють на складчасті, або плікативні (лат. *plikatys* — складчастий), та розривні, або диз'юнктивні (лат. *disjuncto* — розділяю).

Сформовані структури внаслідок тектонічних рухів зазвичай сприяють утворенню умов для нагромадження скупчень нафти й газу, а також формуванню інших родовищ корисних копалин. Наприклад, у розривних структурах рудоносні розчини відкладають гідротермальні мінерали свинцю, міді, ртуті, золота, срібла тощо. Складчасті структури є свого роду пастками для накопичення вуглеводнів. Водночас тектонічні порушення інколи руйнують родовища, що утворилися раніше.

Матеріали дистанційних зондувань (МДЗ) є об'єктивним і найбільшим за обсягом джерелом метричної та семантичної інформації про стан поверхні Землі та об'єктів на ній, що дає змогу розв'язувати геологічні задачі на всіх без винятку етапах і стадіях геологорозвідувальних робіт — від

прогнозу до розвідки і освоєння родовищ. При цьому на кожній стадії робіт, залежно від масштабу і розв'язуваних задач, можна використовувати свій найінформативніший комплекс космічних даних. Використання МДЗ дає змогу оперативно, в короткі терміни виділяти в межах території пошукових робіт найперспективніші ділянки обмеженого розміру для детального обстеження традиційними геофізичними методами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед праць вітчизняних учених, присвячених застосуванню МДЗ у геології, слід відзначити монографії та публікації В.І. Лялька, В.С. Готиняна, О.Т. Азімова, С.М. Єсиповича, А.Г. Мичака та багатьох інших. Проте аерокосмічний аспект дослідження геологічних процесів і явищ, зокрема залягання гірських порід, за допомогою МДЗ висвітлений не досить повно в сучасних вітчизняних публікаціях. Тому вивчення геометрії порід осадового чохла та динаміки її змін за допомогою МДЗ є актуальним науковим і прикладним завданням.

Виклад матеріалу дослідження. Визначення елементів залягання гірських порід [1] (азимут простягання, кут падіння та азимут падіння) є копіткою роботою, яку виконують вручну безпосередньо в польових умовах із використанням спеціалізованих вимірювальних засобів (геологічного компаса).

Часто фізичний доступ до відслонень гірських порід ускладнений, а іноді неможливий. І навіть за умови наявності доступу до відслонення нерідко буває складно з'ясувати напрямок падіння гірських порід, особливо в умовах обмеженої оглядовості відслонення та сукупності інших несприятливих зовнішніх факторів. Імовірність грубого промаху є високою, що спричиняє помилки в результуючій геологічній карті. Також людина не завжди може визначити координати необхідної точки та елементи

¹ Загальноприйнята геологічна термінологія.

залагання порід безпосередньо. На знаходження доступних відслонень, обхід всієї потрібної території, виконання польових робіт з визначення елементів залагання витрачається багато часу.

Як свідчить досвід роботи з МДЗ, вони містять винятково важливу інформацію про тектонічну будову величезних ділянок земної поверхні. За космічними знімками можна виявляти і досліджувати розривні і складчасті структури різних розмірів (від локальних до регіональних і глобальних) та їх взаємозв'язки і взаємовідношення. При цьому найчіткіше розпізнаються розривні порушення [1].

Незважаючи на малосприятливі і складні геолого-геоморфологічні та інші природні умови, під час структурно-геологічного дешифрування робота з МДЗ дає змогу отримувати багато корисної інформації про тектоніку платформного чохла і фундаменту.

За наявності МДЗ можна значно скоротити час пошуку координат точок виходів на земну поверхню гірських порід, а також, що надзвичайно важливо, дистанційне зондування дає змогу обирати необхідні точки, які є недоступними для безпосереднього вимірювання координат та елементів залагання певного відслонення на місцевості. За допомогою геометричної моделі, що передбачає апроксимацію поверхні нашарувань гірських порід площиною (в межах обраного просторового околу), та на підставі даних дистанційних зондувань можна розробити й програмно реалізувати алгоритм обрахунку необхідних елементів залагання гірських порід.

Роль людини (експерта з фотогологічного дешифрування) в цій роботі зводиться до інтерактивної векторизації в середовищі ГІС ліній контактів між гірськими породами і вибору точок, за якими визначатимуть елементи залагання.

На відміну від традиційного способу визначення елементів гірських порід шляхом прямих вимірів у польових умовах пропонуємо принципово інший підхід до вирішення цього завдання.

Головна ідея полягає у проведенні геологічного дешифрування МДЗ [2]: на основі космознімків оптичного діапазону локалізуємо на місцевості різні літотиби і простежуємо (векторизуємо у середовищі ГІС) контакти між ними; створені векторні шари характеризуємо атрибутивною інформацією — числовими значеннями координат за трьома координатними осями (значення висоти отримуємо з цифрової моделі місцевості). За таким набором координат на основі методу найменших квадратів [3] розраховуємо рівняння площини, що апроксимує площину нашарування гірських порід, і координати вектора-нормалі до цієї площини.

Надалі шляхом нескладних геометричних перетворень визначаємо числові значення елементів залагання. Описаний алгоритм реалізований у середовищі ArcPy.

Нижче наведено визначення основних елементів залагання:

- лінія простягання — лінія перетину будь-якої геологічної поверхні з горизонтальною площиною;
- лінія падіння — лінія, перпендикулярна до лінії простягання, розташована на геологічній поверхні;
- кут падіння — кут між лінією падіння геологічної поверхні та її проекцією на горизонтальну площину, який знаходиться в межах від 0° до 90° ;
- азимут простягання — правий векторний кут між північним напрямком географічного меридіана та лінією простягання;
- азимут падіння — правий векторний кут між напрямком на північ та проекцією лінії падіння на горизонтальну площину.

Далі опишемо автоматизований розрахунок елементів залагання гірських порід за МДЗ. Він ґрунтується на математичній апроксимації поверхні нашарувань площиною:

$$ax + by + cz = 1,$$

де x, y — планові координати; z — висота; a, b, c — шукані коефіцієнти (рисунок).

Для розрахунків використано метод найменших квадратів. Вхідними даними є координати виявлених на космознімку (дешифрованих і векторизованих)

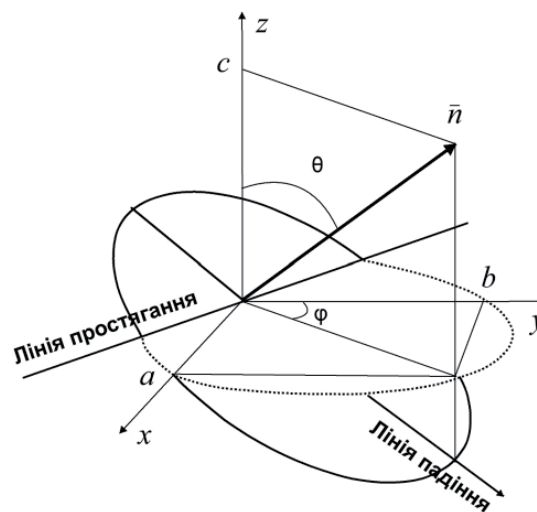


Рис. 1. Визначення елементів залагання: геометрична модель
Fig. 1. Dip and strike determination: a geometric model

них у ГІС) точок виходу поверхні нашарувань на земну поверхню [10].

Для математичної моделі поверхні нашарувань система нормальних рівнянь має вигляд

$$\begin{cases} a \sum_i x_i^2 + b \sum_i x_i y_i + c \sum_i x_i z_i = \sum_i x_i, \\ a \sum_i x_i y_i + b \sum_i y_i^2 + c \sum_i y_i z_i = \sum_i y_i, \\ a \sum_i x_i z_i + b \sum_i y_i z_i + c \sum_i z_i^2 = \sum_i z_i. \end{cases}$$

Цю систему рівнянь можна розв'язати різними способами, одним з яких є спосіб Крамера [6]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{vmatrix}.$$

Унаслідок розрахунків отримаємо шукані коефіцієнти a , b , c :

$$a = \frac{\begin{vmatrix} \sum x_i & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{vmatrix}}{\Delta},$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{vmatrix}}{\Delta},$$

$$c = \frac{\begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i \end{vmatrix}}{\Delta}.$$

За значеннями коефіцієнтів стає можливим обчислення кута падіння θ :

$$\theta = \arccos \frac{|c|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}},$$

а також визначення азимута падіння φ :

$$\varphi = \begin{cases} \arccos \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} & a > 0, \quad b > 0, \\ 2\pi - \arccos \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} & a < 0, \quad b > 0, \\ \pi - \arccos \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} & a > 0, \quad b < 0, \\ \pi + \arccos \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} & a < 0, \quad b < 0, \end{cases}$$

$$\varphi = \begin{cases} 0, & a = 0, \quad b > 0, \\ \frac{\pi}{2}, & a > 0, \quad b = 0, \\ \pi, & a = 0, \quad b < 0, \\ \frac{3\pi}{2}, & a < 0, \quad b = 0. \end{cases}$$

Запропонована методика має недоліки, які унеможливають її широке практичне застосування: недостатня спектральна та/або просторова розрізненість супутникових знімків; несприятливі для геологічного дешифрування місцевості умови (слабко

розчленований рельєф, наявність суцільного рослинного покриву, перекриття виходів корінних порід четвертинними відкладами, навіть малопотужними) [5, 7].

Точність визначення числових елементів залягання гірських порід зумовлена як характеристиками цифрових зображень (мультиспектральних і цифрової моделі місцевості) [8], так і точністю позиціонування інструментів векторизації в геоінформаційному середовищі за ручного опрацювання космічних знімків.

Проте запропонований метод є оптимальним у математичному сенсі і зручним у програмній реалізації. За потреби можна виконувати повторні контрольні виміри (що реалізувати шляхом прямих вимірів у польових умовах практично неможливо). Крім того, метод значно менш затратний порівняно з вартістю польових робіт. У цьому контексті автоматизоване визначення елементів залягання гірських порід за даними дистанційних зондувань є доцільним на етапі попереднього вивчення території дослідження, для інформаційного забезпечення подальших польових робіт.

Загалом методика визначення елементів залягання гірських порід за даними МДЗ має такий вигляд.

1. Завантаження супутникового знімка чи аерофотознімка на ділянку дослідження. Виконання (за потреби) операції радіометричної та геометричної корекції знімка [8]. Завантаження цифрової моделі місцевості.

2. Експертне геологічне дешифрування з метою виявлення виходів на земну поверхню гірських порід різного літологічного складу і простеження контактів між ними [5, 7].

3. Векторизація в ГІС-середовищі контактів між виявленими літотипами. Формування бази геоданих, що містить x -, y -, z -координати точок (вузлів) ліній контактів [4].

4. Реалізація наведеного алгоритму визначення елементів гірських порід (зокрема, у середовищі ArcPy та створення нового інструменту у середовищі ArcGIS на основі написаної програми) [9].

Висновки. Запропонована робота є прикладом ефективного використання методів дистанційного зондування Землі та програмування при вирішенні геологічних завдань. Оперативність та якість визначення елементів залягання гірських порід на підставі матеріалів дистанційного зондування Землі у напівавтоматизованому варіанті переважають над його очевидними недоліками.

Список бібліографічних посилань

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: монографія [за ред. В.І. Лялька, М.О. Попова]. К.: Наук. думка, 2006. 360 с.
2. Железняк О.О., Зацерковний В.І., Кислюк В.С., Ніколаєнко О.Є. Космічні та геоінформаційні

- системи. Ніжин: Вид-во Ніжин. держ. ун-ту ім. М. Гоголя, 2016. 374 с.
3. Жуков М.Н. Математична статистика та обробка геологічних даних: підручник. Київ: Видавн.-полігр. центр «Київський університет», 2008. 518 с.
 4. Зацерковний В.І., Тишаєв І.В., Демидов В.К. Геоінформаційні системи в науках про Землю. Ніжин: Вид-во Ніжин. держ. ун-ту ім. М. Гоголя, 2016. 510 с.
 5. Петрусеви́ч М.Н. Аэрометоды при геологических исследованиях. Москва: Госгеолтехиздат, 1962. 408 с.
 6. Прави́ло Крамера. Метод обратной матрицы. [Електронний ресурс]. Режим доступа: http://www.math-profi.ru/pravilo_kamera_matrichnyi_metod.html (дата звернення 07.12.2016).
 7. Miller V.C. Photogeology. McGraw-Hill Book Co., 1961. 245 p.
 8. Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Third ed. Elsevier, 2007. 515 p.
 9. Silas T. ArcPy and ArcGIS — Geospatial Analysis with Python. PACKT Publishing, 2015. 224 p.
 10. SRTM Tile Grabber. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://dwtkns.com/srtm/> (дата звернення 07.12.2016).

Надійшла до редакції 28.01.2019 р.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЛЕГАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

В.И. Зацерковный, И.В. Тишаев, Е.Н. Пилипенко

УНИ «Институт геологии» Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина, e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, ivantishaev@gmail.com, olena.pylypenko95@gmail.com

Рассмотрен подход использования материалов дистанционного зондирования для определения элементов залегания горных пород. С помощью геометрической модели, которая предусматривает аппроксимацию поверхности наслоений горных пород плоскостью (в границах выбранной пространственной окрестности), и на основе материалов зондирования можно разработать и программно реализовать алгоритм расчета необходимых элементов залегания горных пород. В отличие от традиционного способа определения элементов залегания горных пород путем прямых измерений в полевых условиях предложен принципиально другой подход решения этой задачи.

Ключевые слова: материалы дистанционного зондирования, геоинформационные системы, линия падения, линия простирания, азимут падения, азимут простирания.

THE APPROACH TO USE OF REMOTE SENSING DATA FOR DEFINITION THE DIP AND STRIKE OF ROCK LAYERS

V.I. Zatserkovnyi, I.V. Tishaev, O.M. Pylypenko

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine, e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, ivantishaev@gmail.com, olena.pylypenko95@gmail.com

In the article the following topic is investigation — the approach to use of remote sensing data for definition the dip and strike of rock layers. By using the geometric model which stipulates an approximation the surface of rock formation layers with flatness and on the basis of remote sensing data it is possible to work out and programmatically to realize the calculation algorithm the dip and strike of rock layers. Unlike in traditional way of definition rock layers elements through the direct dimensioning in-field it is offered conceptually a new approach to solve that task.

Keywords: remote sensing data, geoinformation system (GIS), dip line, strike line, dip azimuth, trend azimuth.

References

1. Baghatospektralni metody dystancijnogho zonduvannja Zemli v zadachakh pryrodokorystuvannja: monohrafija [za red. V.I. Ljaljka, M.O. Popova]. Kyiv: Nauk. dumka, 2006. 360 s.
2. Zheleznyak O.O.? Zacerkovnyj V.I., Kysljuk V.S., Nikolajenko O.Je. Kosmichni ta gheoinformacijni systemy/ Nizhyn: Vyd-vo Nizhyn. derzh. un-tu im. M. Ghogholja, 2016. 374 s.
3. Zhukov M.N. Matematychna statystyka ta obrobka gheologichnykh danykh: pidruchnyk. Kyiv: Vydavn.-polighr. centr «Kyjivskij universytet», 2008. 518 s.
4. Zacerkovnyj V.I., Tishajev I.V., Demydov V.K. Gheoinformacijni systemy v naukakh pro Zemlju. Nizhyn: Vyd-vo Nizhyn. derzh. un-tu im. M. Ghogholja, 2016. 510 s.
5. Petrusevich M.N. Aerometody pri geologicheskikh issledovaniyakh. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1962. 408 s.
6. Pravilo Kamera. Metod obratnoy matritsy [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupa: http://www.mathprofi.ru/pravilo_kamera_matrichnyi_metod.html (data zvernennya 07.12.2016).
7. Miller V.C. Photogeology. McGraw-Hill Book Co., 1961. 245 p.
8. Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Third ed. Elsevier, 2007. 515 p.
9. Silas T. ArcPy and ArcGIS — Geospatial Analysis with Python. PACKT Publishing, 2015. 224 p.
10. SRTM Tile Grabber [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupa: <http://dwtkns.com/srtm/> (data zvernennya 07.12.2016).

Received 28/01/2019