

С. М. Кулік, Т. К. Бурахович

Геоелектричні критерії алмазоносності кори та верхньої мантії Землі

(Представлено академіком НАН України В. І. Старостенком)

The problem of finding the electrical criteria of diamond deposits consists of two parts. The first part is to determine the presence of kimberlite pipes, which is possible due to the difference in resistances between an object in question and the surrounding matter. The second is to study the deep geoelectric sections of the Earth crust and Upper mantle in order to estimate the thickness of the lithosphere. The first part is solved by the methods of transitional processes in the superficial and aero versions and the audiomagnetotelluric sounding. It was done, for example, in South Africa, Canada, North-Western territories, in the Arkhangelsk region in Russia, and in Western Australia. The second part can be solved by deep magnetotelluric and magnetovariation soundings, as it was demonstrated by the example of the Slave craton in Canada.

Для розв'язання “алмазної проблеми” геоелектричними методами використовують такі принципові напрями: пошук та розвідка кімберлітів та інших порід, у яких присутні алмази; виділення територій та площ, у надрах яких алмази можуть утворюватися. В рамках першого напрямку успіхи електромагнітних методів пов'язані з існуванням різкого контрасту питомої електропровідності (σ) кімберлітів у порівнянні з середовищем, яке оточує кімберлітові трубки.

Наприклад, в трубках Південної Африки висока електропровідність асоціюється з кімберлітами на відміну від слабкої електропровідності середовища, що оточує, де питомий опір при геоелектричних вимірах досягає 10000 Ом·м [1, 2]. У Канаді, в Північно-Західних територіях кімберліти характеризуються відносно помірною електропровідністю. Питомий електричний опір (ρ) коливається в інтервалі від 200 до 1000 Ом·м на фоні 10000 Ом·м [3]. У той самий час кімберлітові трубки в Архангельській області [4] та в Якутії [5] мають низький контраст питомого опору в порівнянні з породами, що їх оточують. А відклади, що перекривають трубки, характеризуються різкою неоднорідністю. Це справедливо і для західної Австралії, де погано провідні кімберліти розміщуються всередині глинистих сланців [6]. Прояв кімберлітів в Якутській алмазній провінції звичайно пов'язаний з траповими дайками [7]. Проте існують порушення й іншого типу, які пов'язані з переробкою кімберлітів, і їх картування утруднено. Ці порушення не заповнені траповими дайками. Їх не можна побачити на поверхні, вони характеризуються складною структурою: на глибинах порядку 100–200 м — це ізолювані порушення, в інтервалі глибин від 200 до 400 м — суцільні зони тонких тріщин, а глибше — у вигляді брекчій.

За даними аудіомагнітотелуричного зондування (АМТЗ) виявилось, що верхня частина розрізу представлена породами з питомим опором, що дорівнює 40–500 Ом·м, інтервал глибин від 200–250 до 500–600 м — шаром низького значення $\rho = 5\text{--}20$ Ом·м, а нижче 600 м $\rho = (30\text{--}50)$ Ом·м. У той самий час кімберлітовміщуючі розломи мають високий питомий опір (800–1000 Ом·м) на глибинах від 50 до 200 м та низький ($\rho = (2\text{--}6)$ Ом·м) — на глибинах нижче 500 м. Верхні їх частини мають шар порід, що заповнений льодом, а глибше

розміщується зона брекчій з мінералізованими водами з низьким опором. У цьому випадку мінімум фази імпедансу та максимум питомого опору є маркерами алмазоносних структур зазначеного типу.

Найбільш електропровідні частини кімберлітової трубки Первомайська (Архангельська область) простежуються, за даними АМТЗ [8], на глибинах від 150–200 до 600–800 м, де питомий опір кімберлітів коливається від 1 до 10 Ом · м. Цілком можливо, що ці інтервали глибин також пов'язані, як зі зміною типу кімберліту, так і з інтенсивним насиченням порід мінералізованими водами.

Низькі значення ρ для глибоких частин трубок підтверджуються даними індукційного каротажу, які було отримано на кімберлітовій трубці Комсомольська (Якутія) [8]. Ці дані показують, що порфірові кімберліти мають більш високу електропровідність у порівнянні з автолітовою кімберлітовою брекчією, яка в інтервалі глибин 70–236 м характеризується $\rho = 33\text{--}50$ Ом · м; порфірові кімберліти в інтервалі глибин 236–295 м — $\rho = 6,5\text{--}10$ Ом · м.

У Південній Африці [9, 10] геоелектричні методи використовували для досліджень та виявлення масиву сульфідів, в середині якого припускалася наявність кімберлітових трубок. В комплексі з магніторозвідкою проводили електромагнітні дослідження методом перехідних процесів (АМПП). Наступним етапом робіт були наземні методи перехідних процесів з використанням незаземленої петлі. В звичайних умовах цей метод застосовується для пошуку покладів руд з високою електропровідністю, наприклад сульфідів. У конкретному випадку електропровідність кімберліту становила $0,08\text{--}0,6$ См · м⁻¹, в той час як оточуючий простір сульфідів характеризувався значеннями $1\text{--}3$ См · м⁻¹. На цьому провідному фоні яскраво проявилися низькопровідні кімберлітові трубки.

У західній частині Австралії були відкриті алмазоносні трубки [11] за допомогою магніторозвідки, але для виявлення немагнітних трубок використовували метод АМПП. Основним методом пошуків було буріння, але в деяких випадках, якщо буріння не давало задовільного результату, застосовували наземні електромагнітні методи, особливо тоді, коли спостерігався різкий контраст у провідності трубки та середовища, що її вміщує (σ дорівнює $0,1$ См · м⁻¹ та $0,01$ См · м⁻¹ відповідно).

У кімберлітовій області Лас де Грас на Північно-Західній території Канади велику кількість кімберлітових трубок виявлено за геоелектричними методами, оскільки був наявний контраст в електропровідності кімберлітових даєк ($0,02$ См · м⁻¹) та середовища, що їх вміщує ($0,0001$ См · м⁻¹) [12].

Перспективними вважаються такі методи геоелектрики, які дають змогу одержати надійні результати в неоднорідних середовищах, а також методи з підвищеною глибинністю, використання яких дозволяє зменшити вплив приповерхневих неоднорідностей та виявити глибинні аномалії трубкових тіл (АМПП, АМТЗ). У межах іншого напрямку при використанні геоелектричних методів лежить передумова про те, що алмазоносні області повинні мати, по-перше, товсту літосферу, по-друге, давню літосферу, по-третє, літосферу з високою концентрацією вуглецю, тобто вона характеризується існуванням шарів високої електропровідності в надрах земної кори і мантії вище межі стійкості алмаз — графіт.

Пошуки та розвідка родовищ алмазів не обмежується простим виявленням кімберлітів. Знахідки трубок свідчать про шляхи можливого вносу кристалів. Але важливо, що співвідношення тиску і кристалізації вуглецю в алмаз потребує більшу товщину літосфери та більші глибини залягання астеносфери.

Сучасні уявлення про утворення алмазів передбачають те, що межа літосфери — астеносфера характеризується початком часткового плавлення. Навіть дуже низький ступінь

плавлення (0,5%) буде відповідати електричному сполученню і, відповідно, збільшенню електропровідності середовища на 2–3 порядки від іонної провідності флюїду. Глибинні геоелектричні дослідження — ефективний засіб визначення глибини залягання поверхні астеносфери, відповідно й товщини літосфери.

Провінція Слейв у Канаді — природна лабораторія для комплексного вивчення геохімічних, тектонічних та геофізичних даних, для побудови основних літосферних одиниць. Слейв кратон — невелике архейське ядро в межах великого північного Американського кратону. Вивчення Слейв кратону та його взаємозв'язок з протерозойськими областями, що залягають на сході, було проведено глибинним сейсмічним зондуванням, електромагнітними методами та додатковими геохімічними та геологічними роботами. В межах геоелектричних досліджень [13, 14] реєструвалося змінне низькочастотне природне електромагнітне поле в інтервалі частот/періодів 10 кГц — 100 Гц (АМТ), 100 Гц — 1000 с (МТЗ), 20 с — 10000 с (ГМТЗ). У цьому регіоні змінне електромагнітне поле на періоді 300 с проникає на 150–200 км у середину літосфери. Високі значення фази імпедансу (80°) характерні для всього регіону Лас де Грас. Фази монотонно зменшуються на $6\text{--}10^\circ$ при віддаленні від аномалії. Якісна інтерпретація мапи фаз імпедансу дає основу до передбачення того, що в зазначеній області або збільшена електропровідність у середині верхньої мантії, або виникає підйом підшви літосфери в порівнянні з прилеглими регіонами.

2D інверсія магнітотелуричних даних дозволила побудувати двовимірну модель розподілу питомого електричного опору вздовж профілю, який простягається з південного заходу на північний схід. У центральній частині кратону виявлено різке зменшення електроопору на глибинах від 80 до 100 км (до 30 Ом · м) [13, 14]. Висока електропровідність просторово розміщена від оз. Контуойто до оз. Локхарт. Завдяки екранувальному ефекту, який викликаний областю високої електропровідності, неможливо було отримати геоелектричні параметри нижче вказаної глибини.

Порівняння просторового положення, протяжності та глибини мантійного провідника та мапи поширення ультрадеплетованого гарцбургітового шару [15] показує, що вони чудово збігаються. Але олівін та гарцбургіт мають високий електричний опір, тобто в цьому інтервалі глибин повинна існувати інша провідна фаза, яка приводить до збільшення значення електропровідності. Є два домінуючих механізми перетікання індукційних струмів у середині мантії. По-перше, іонна провідність, по-друге, електронна провідність. Більш того, можна зробити припущення про існування літосферно-астеносферної межі, враховуючи наявність кімберлітів Лас де Грас еоценового віку та наявність частково розплавленої фази, що спричинює зменшення опору. Але ця обставина малоімовірна, тому що повинна була привести до високих значень теплового потоку.

Вільний флюїд — вода може збільшити електропровідність на глибинах більш ніж 60 км (2 ГПа), оскільки зв'язаний флюїд підвищує електропровідність, починаючи з 80 км. Але з урахуванням минулого геологічного часу навряд чи можливо було очікувати існування вільних флюїдів. Разом з цим вилучаються й мінерали, які утримують гідрати, оскільки вони не були знайдені в зразках ксенолітів. З іншого боку, може проявитися дифузія водню в мантії, при цьому олівін повинен бути насичений воднем.

При електронному типі електропровідності вуглець має високу провідність. Вище за рівень стійкості алмазу (125 км) вуглець може бути у формі високопровідного графіту, в той час як нижче цього рівня вуглець кристалізується як алмаз з високим питомим опором. Діаманти були знайдені на цих самих глибинах.

Вуглець у провінції Лас де Грас, можливо, відкладався у вигляді безперервних плівок завдяки дії тектонічних процесів.

Сульфіди у літосфері та можуть переміщуватися до гори та кристалізуватися на невеликих глибинах, а також утворювати безперервну сітку у мантії. Розплави сульфідів змогли б пояснити високу електропровідність у Сієрра Невада, але в районі дослідження їх кількість незначна.

Отже, нами зроблено висновок, що і водень, і вуглець, і меншою мірою сульфіди, є ймовірною причиною збільшення питомої електричної провідності на глибинах 80 км у верхній мантії Лас де Грас. Походження всіх цих трьох джерел високої провідності пов'язане з тектонічними процесами. Просторовий зв'язок електричного провідника та шару, що сильно деплетований, зумовлений більш давніми тектонічними процесами, які не пов'язані з кімберлітами еоценового віку.

Водень та вуглець мають можливість переміщуватись внаслідок субдукційних процесів. У рамках цієї моделі частина океанічної мантії, що збагачена водою, винесена та приєднана до основи вже існуючої літосфери [15]. Потік CO₂, що проникає у цю частину мантії, буде утворювати вуглецеву фазу у вигляді гальванічно пов'язаних графітових плівок, які, можливо, й забезпечують істотне зменшення опору і стають джерелом аномалії електропровідності в мантії.

У світовій практиці геоелектричні методи зайняли цілком конкретне місце при пошуках та розвідці алмазів завдяки тому, що кімберлітові трубки насамперед відрізняються електричним опором в порівнянні з середовищем, що містить ці структури. Доступність, швидкість вимірювання геоелектричних полів, інтерпретації спостережуваних даних, змога використовувати аероелектромагнітні методи дозволяють з успіхом застосовувати електророзвідку для розв'язання поставленої мети.

Комплекс геофізичних і геологічних методів, який включає глибинне магнітотелуричне зондування та магнітоваріаційне профілювання, було реалізовано в Канаді. Доведено, що аномалії електропровідності в верхній мантії докембрійського кратону на глибинах від 80 до 100 км можуть вважатися критерієм алмазоносності структури.

1. *Gerryts E.*, 1970. – Diamond prospecting by geophysical methods. Canadian Centennial Conf. on Mining and groundwater geophysics // Geol. Surv. Canada Econ. Geol. – 1970. – **26**. – P. 439–446.
2. *Jansen J. C., Doyle B. J.* The Tli Kwi Cho kimberlite complex, Northwest territories, Canada: a geophysical post mortem // Practical Geophys. Short Course. Northwest Mining Assoc. – Spokane, Washington, 1998. – P. 78–91.
3. *Jellicoe B. C., Robertshaw P., Williamson P., Murphy J.* Summary of Exploration activities and results for the Fort a la Corne diamond project, Saskatchewan: Summary of Investigations // Geol. Surv. Sask. Energy and Mines, Misc. – 1998. – **98**, No 4. – P. 144–157.
4. *Масоткин И. Л., Журавлев Д. З., Саблуков С. М. и др.* Плом-литосферные взаимодействия как геодинамическая модель формирования Архангельской алмазоносной провинции // Докл. АН. – 1997. – **353**, № 2. – С. 228–232.
5. *Полтарацкая О. Л., Панрин В. П., Попов Г. И.* Западно-Якутская аномалия электропроводности // Коровые аномалии электропроводности. – Ленинград: Наука, 1984. – С. 116–122.
6. *Jenke G.* The role of geophysics in the discovery of the Ellendale and Fitzroy Kimberlites: 3-rd Biennial Conf. 21–23 ауд., 1983. – Austral. Soc. Expl // Geophys. 1983. – **25**. – P. 66–72.
7. *Сараев А. К., Пертель М. И., Нижифоров А. Б., Романова Н. Е.* Опыт применения аудиоманнителлурических зондирований при поисках кимберлитов. II Всерос. шк.-сем. по электромагнитным зондированиям Земли, 28–30 нояб. 2005 г., г. Москва. – Москва, 2005. – 14 с.
8. *Сараев А. К., Пертель М. И., Ларионов К. А.* Применение АМТЗ для поисков кимберлитовых трубок: Тез. 9-й Регион. конф. “Распространение радиоволн” НИИРФ. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербург. гос. ун-т, 2003. – 92 с.

9. *Macnae J. C.* Application of geophysics for the detection and exploration of kimberlites and lamproites // *J. Geochem. Explor.* – 1995. – **53**. – P. 213–243.
10. *Macnae J. C.* Kimberlites and exploration geophysics // *Geophys.* – 1979. – **44**. – P. 1395–1416.
11. *Jenke G., Cowan D. R.* Geophysical signature of the Ellendale lamproite pipes, Western Australia Geophysical signatures of Western Australian mineral deposits // *Geol. and Geophys. Univer. West. Australia.* – 1994. – **26**. – P. 403–414.
12. *Smith R. S., Annan A. P., Lemieux J., Pedersen R. N.* Application of modified GEOTEM system to the reconnaissance exploration for kimberlites in the Point Lake area: NWT, Canada // *Geophys.* 1996. – **61**. – P. 82–92.
13. *Jones A. G., Ferguson I. J., Chave A. D. et al.* The electric lithosphere of the Slave craton // *Geol.* – 2001. – **29**. – P. 423–426.
14. *Wu X., Ferguson I. J., Jones A. G.* Magnetotelluric response and geoelectric structure of the Great Slave Lake Shear Zone // *Earth Planet. Sci. Let.* – 2002. – **196**. – P. 35–50.
15. *Griffin W. L., Doyle B. J., Ryan C. G. et al.* Layered mantle lithosphere in the Lac de Gras area, Slave craton: composition, structure and origin // *J. Petrology.* – 1999. – **40**. – P. 705–727.

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна
НАН України, Київ

Надійшло до редакції 23.08.2006

УДК 528.88.63

© 2007

Член-кореспондент НАН України **В. І. Лялько, О. І. Сахацький,
Г. М. Жолобак, Л. Д. Греков**

Контроль площ та стану озимих культур за допомогою знімків MODIS/TERRA та SPOT XI (на прикладі Київської області)

The research of the possibility to use autumn MODIS/TERRA images for the determination of the area and growth conditions of winter crops in the Kyiv region is carried out. The total area of winter wheat fields and winter raps under harvest-2006 has been determined within the indicated region using remote sensing data. It was determined that the total area of winter cultures, identified by using MODIS/TERRA images, differs from that presented in opened information sources by 4–7%. It is shown that satellite data are sensitive to changes of the vegetation covering caused by the tillering of winter cereal crops. It was a background for the determination of the area of winter crops with different growth stage conditions before entering the winter period. The results of the processing of high resolution SPOT XI image were used as reference data for the evaluation of the accuracy of the identification of areas using MODIS/TERRA images. It is proposed to use these methodical approaches for the determination of the area and growing conditions of winter crops for the whole territory of Ukraine.

Впродовж третини століття світова наукова спільнота досліджує можливості застосування знімків земної поверхні з космічної орбіти для розв'язання низки прикладних задач. Важливою складовою серед них є супутникові спостереження за станом рослинності суходолу, зокрема сільськогосподарських угідь. Знімки зі супутника Landsat були першими при розробці системи моніторингу аграрних об'єктів, однак лімітовані часові просторові показники покриття цим супутником під час критичних (фазових) періодів розвитку рослин роблять