

Геоелектричні неоднорідності Керченського залізорудного басейну

І. Ю. Ніколаєв¹, Т. К. Бурахович², А. М. Кушнір², Є. М. Шеремет¹, 2021

¹Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення
ім. М. П. Семененка НАН України, Київ, Україна

²Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 17 червня 2021 р.

Уперше для Керченського півострова побудовано тривимірну геоелектричну модель земної кори і верхньої мантії за результатами експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі, виконаних в 2007—2013 рр. інститутами НАН України; проведено її фізико-геологічну інтерпретацію і деталізацію приповерхневої частини за даними методу аудіомагнітотелуричного зондування для вивчення глибинної будови Керченського залізорудного басейну. На схід від Корсацько-Феодосійського розлому вздовж південної частини Індоло-Кубанського прогину (на півночі Південнокерченської та майже під всією Північнокерченською зоною) на глибинах від 2,5 до 12 км виявлено низькоомну аномалію ($\rho=1$ Ом·м) завширшки майже 20 км. Її східна частина розташована в консолідованій земній корі та гальванічно зв'язана з поверхневими осадовими товщами, західна частина повністю знаходиться в осадових відкладах. Аномалія охоплює територію Керченського залізорудного басейну і прояви грязьового вулканізму. Характеристику верхньої частини шаруватого геоелектричного розрізу Керченського півострова в інтервалі перших сотень метрів отримано за результатами одновимірної інверсії даних аудіомагнітотелуричного зондування (діапазон частот 8—4000 Гц). Показано, що перші 15 м розрізу, що відповідають четвертинним відкладам, виділяються значеннями електроопору до 1 Ом·м. Нижче, у неогенових відкладах, електроопір підвищується до значень 5 Ом·м і більше. За горизонталлю і вертикаллю розподіл значень електроопору має мінливий характер, що виявляється у тонкошаруватій структурі з його низькими значеннями. Можливо, такі ділянки безпосередньо зв'язані з каналом транспортування сопкового матеріалу та газів. Передбачається зв'язок між низькоомними тонкошаруватими приповерхневими ділянками, глибинною аномалією електропровідності у верхній частині земної кори та, ймовірно, високою електропровідністю гірських порід на глибинах верхньої мантії із залізорудними родовищами, а також з проявами грязьового вулканізму. Неоднорідність корових та мантійних високопровідних шарів може засвідчувати високу проникність глибинних флюїдів зон контактів.

Ключові слова: земна кора, мантія, 3D геоелектрична модель, глибинні та аудіомагнітотелуричні зондування, аномалії електропровідності, грязьовий вулканізм, Керченський залізорудний басейн.

Вступ. Під час низькочастотних геоелектромагнітних досліджень земної кори виявлено, що найбільший внесок в обумовлені значення електропровідності роблять іонні та електронні провідники. Питомий електричний опір (ρ) мінералів, що складають гірські породи, перевищує десятки тисяч омметрів. Лабораторні ви-

мірювання питомого опору сухих зразків гірських порід показують приблизно той самий результат. Однак заміряна величина ρ гірських порід в їх природному заляганні на кілька порядків менша. Пояснити відмінність експериментальних значень від лабораторних за наявності пористості та тріщинуватості, вологості і мінералізації

підземних вод можна з урахуванням температури і тиску або певного мінерального складу порід та ін.

Останнім часом при пошуках і розвідці рудних родовищ використовують електророзвідувальні роботи із застосуванням магнітотелуричного зондування (МТЗ), його високочастотної модифікації (АМТЗ) та магнітоваріаційного профілювання

(МВП). Ці методи засновані на вивченні природного змінного електромагнітного поля Землі, яке містить коливання різної частоти; через явища скін-ефекту більш високочастотні коливання МТ-поля швидше згасають з глибиною та несуть інформацію лише про приповерхневу частину розрізу, тоді як низькочастотні компоненти спектра проникають на великі глибини.

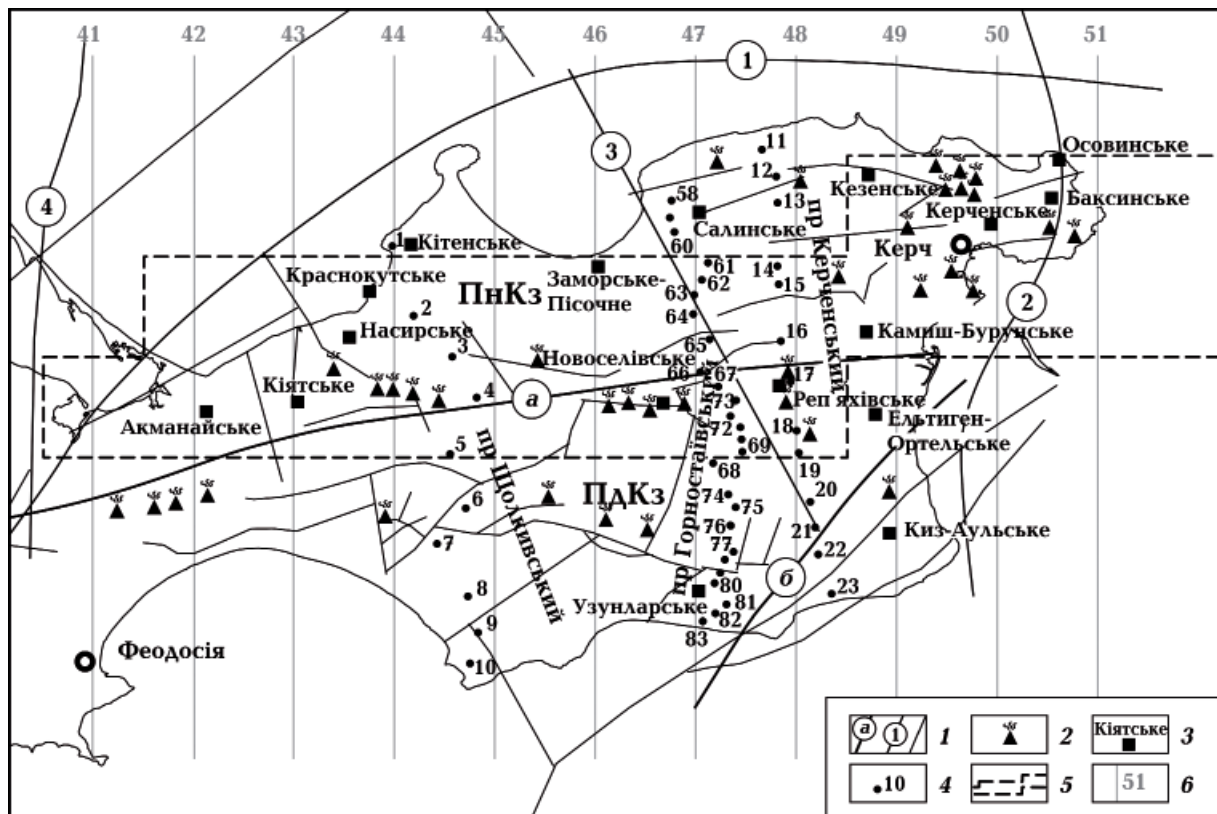


Рис. 1. Схема розташування пунктів АМТЗ та аномалії електропровідності на Керченському півострові: 1 — розривні порушення (структури I, II порядку, регіональні розриви); головні розривні структури — розломні структури I порядку (букви у кружках: а — розлом, що розділяє Гірський Крим і Скіфську плиту (Передгірна сутура, за [Юдин, 1995]), б — Правдинська); розломи II порядку, за [Тектоническая карта..., 1988] (цифри у кружках: 1 — Південноазовський, 2 — Керченсько-Чкаловський, 3 — Горностаївський, 4 — Корсацько-Феодосійський); 2 — грязьовий вулкан (за даними [Тектоническая карта..., 1988; Шнюков та ін., 1971]); 3 — родовище заліза, назва (за даними [Шнюков та ін., 1971]); 4 — пункт АМТЗ; за 3D моделлю розподілу питомого опору Кримського регіону: 5 — проекція на поверхню провідника (за даними [Кушнір, Бурахович, 2021]); 6 — лінії вертикальних зрізів (пр. 41—51 з кроком 10 км).

Регіональні тектонічні структури: ПнКз — Північнокерченська, ПдКз — Південнокерченська зони.

Fig. 1. The scheme of the AMTZ points and anomaly of an electrical conductivity on the Kerch Peninsula: 1 — faults (structures of the first order, second order, regional faults); major faults structures of the first order (letters in circles): a — the fault separating the Mountain Crimea and the Scythian plate (Predgorna suture); б — Pravdynska; structures of the second order (numbers in circles: 1 — Pivden-Azov, 2 — Kerch-Chkalovsk, 3 — Gornostaevskiy, 4 — Korsak-Feodosia); 2 — mud volcano; 3 — iron deposit, name; 4 — AMTZ points. By the results of 3D modeling of the distribution of electrical resistivity of the Crimean region: 5 — conductor's projection to a day surface; 6 — lines of the vertical sections (pr. 41—51 by the step of 10 km).

Regional tectonic structures: ПнКз — Pivnichnokerchenska zone; ПдКз — Pivdennokerchenska zone.

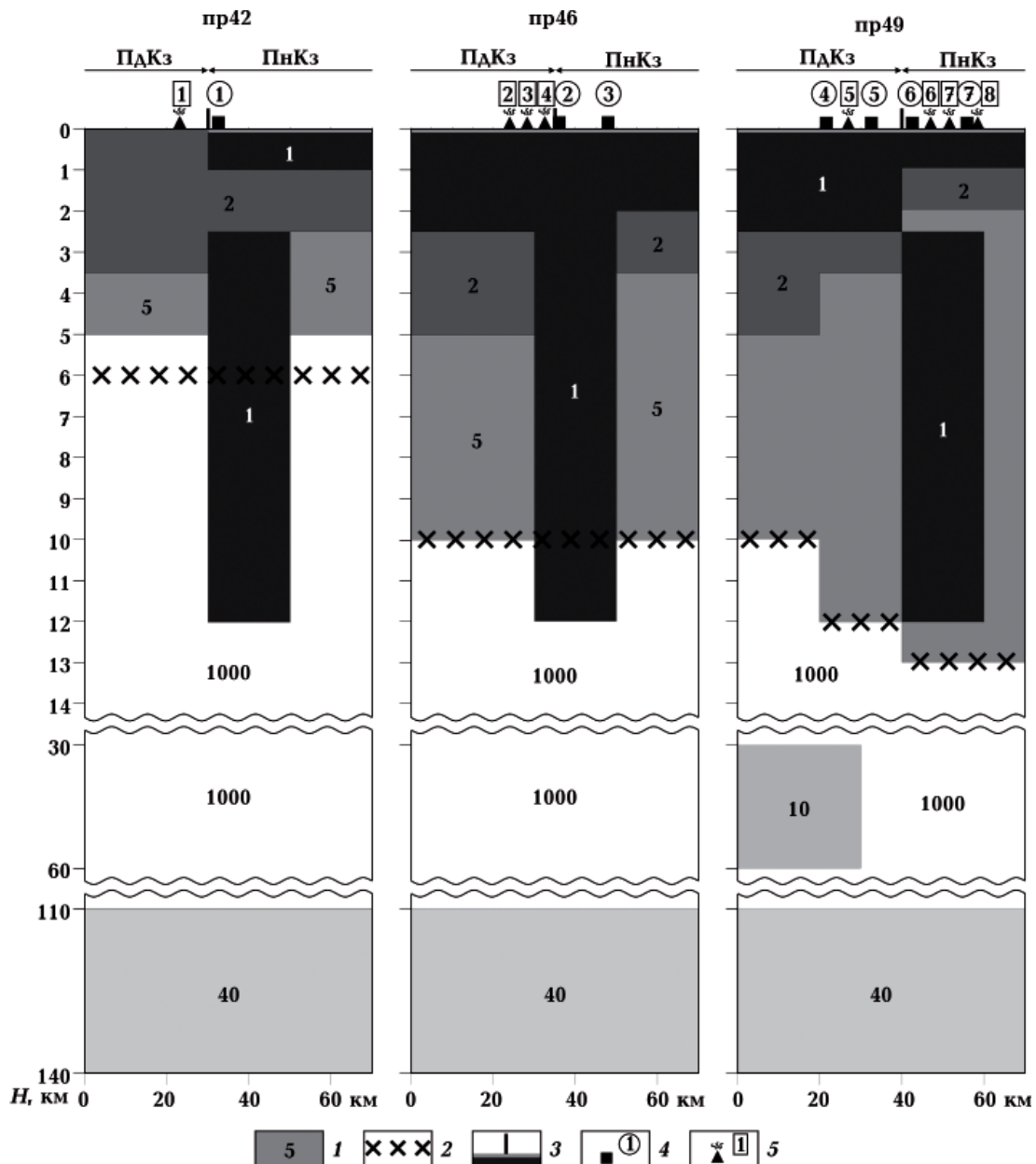


Рис. 2. Приклади вертикальних зрізів (пр. 42, 46, 49) тривимірної моделі розподілу електричного опору земної кори і верхньої мантії Керченського півострова: 1 — значення електроопору блока моделі (Ом·м); 2 — межа консолідованого фундаменту; 3 — проекція на земну поверхню лінії розлому, що розділяє Гірський Крим і Скіфську плиту; 4 — родовища заліза (цифри у кружках: 1 — Акманайське, 2 — Новоселівське, 3 — Заморське-Пісочне, 4 — Киз-Аульське, 5 — Ельтиген-Ортельське, 6 — Камиш-Бурунське, 7 — Кезенське); 5 — грязьові вулкани (цифри у прямокутниках: 1 — Арма-Елі; 2 — Борух-Оба; 3 — Джау-Тепе; 4 — Новоселівський; 5 — Чонгелецький; 6 — група вулканів: Андріївський, Джарджав, Солдатсько-Слобідський; 7 — Бураський; 8 — група вулканів: Великотарханський, Малотарханський, Булганацький). Інші умовні позначення див. на рис. 1.

Fig. 2. Examples of vertical sections (by the pr.42, 46, 49) of 3D model of the distribution of electrical resistivity in the earth's crust and upper mantle of the Crimean region: 1 — electrical resistance value (Ohm·m); 2 — the boundary of the consolidated foundation; 3 — projection to a day surface of the fault separating the Mountain Crimea and the Scythian plate; 4 — iron deposit (numbers in circles: 1 — Ak-Monai; 2 — Novoselivka; 3 — Zamorske-Pisochne; 4 — Kiz-Aul; 5 — Eltigen-Ortel; 6 — Kamysh-Burun; 7 — Kezen. 5 — mud volcano (numbers in rectangle: 1 — Arma-Eli; 2 — Borukh-Oba; 3 — Gau-Tepe; 4 — Novoselivsky; 5 — Chonhelek; 6 — group of volcanoes: Andriivsky, Dzhardzhava, Soldat-Sloboda; 7 — Burash; 8 — group of volcanoes: Veliko-Tarkhan, Malo-Tarkhan, Bulhanak). Legend See Fig. 1.

Мета дослідження полягає в інтерпретації в межах Керченського півострова тривимірної моделі розподілу електричного опору земної кори і верхньої мантії Кримського регіону [Кушнір, Бурахович, 2021]. Глибинна геоелектрична модель побудована за сучасними експериментальними спостереженнями МТЗ та МВП [Бурахович та ін., 2016], які було виконано у 2007—2013 рр. інститутами НАН України. Методика 3D моделювання, що проводилось із застосуванням апарата Mtd3wd [Maskie et al., 1994], та розрахунки 3D моделей детально описано у публікації [Кушнір, 2019].

У цьому дослідженні увагу приділено таким основним питанням:

1) подальша інтерпретація глибинної геоелектричної моделі, а саме її фізико-геологічне тлумачення з метою вивчення глибинної будови Керченського залізородного басейну;

2) аналіз і розрахунки глибинної верхньомантії частини геоелектричної моделі із застосуванням уявлень про глибинну будову Керченського півострова, отриманих за даними інших геофізичних методів;

3) деталізація приповерхневої частини моделі за результатами експериментальних спостережень методом АМТЗ, що проведені у 2007—2008 рр. [Шеремет та ін., 2016].

Аналіз геоелектрично неоднорідних зон. Розглянемо східну частину тривимірної моделі Криму, а саме Керченський регіон, за серією глибинних розрізів субмеридіональних профілів (пр. 42—51); пр. 44, 48 та 49—51 відповідають профілям експериментальних спостережень МТЗ: Керч-2, Керч-1, Керч-3 [Бурахович та ін., 2016; Шеремет та ін., 2016]), крок між ними 10 км, довжина 70 км (рис. 1, 2). Профілі перетинають Північно- (ПнКз) і Південно-керченську (ПдКз) зони та розлом консолидованої кори I рангу, що їх розмежовує (приклади ілюструє рис. 2).

Регіон дослідження характеризується складним розподілом сумарної позовжньої провідності приповерхневих шарів

(S_{oc}) у середньому близько 3000 См (від 1500 См для локальних різноорієнтованих зон на півдні до 5000 См на півночі, за межами материкової частини в акваторії Азовського та Чорного морів від 1000 до 10 000 См) та глибиною поверхні консолидованого фундаменту (від 5 км на заході до 14 км на північному сході). Відповідно до цих параметрів розподіл ρ осадових відкладів коливається від 1 до 5 Ом·м на фоні величини $\rho=1000$ Ом·м консолидованої земної кори. Слід зазначити, що в регіоні відсутня чітка залежність розподілу S_{oc} від потужності осадових відкладів та кореляції з основними структурними геологічними одиницями.

Низькоомну аномалію ($\rho=1$ Ом·м) завширшки майже 20 км за результатами тривимірного моделювання виявлено на схід від Корсацько-Феодосійського розлому вздовж південної частини Індоло-Кубанського прогину. Так, частина ПдКз та майже вся територія ПнКз, з можливим продовженням на Таманському півострові, проявилися в аномалії електропровідності на глибинах від 2,5 до 12 км (див. рис. 1). Якщо на пр. 42—44 більша частина аномалії розташована в консолидованій земній корі та гальванічно пов'язана з поверхневими осадовими товщами, то вже на пр. 48—51 вона повністю розміщується в осадових відкладах (рис. 2).

Глибше у консолидованих породах перемижуються однорідні та неоднорідні за ρ шари: 1) однорідний, інтервал глибин від 5—14 до 30 км, $\rho=1000$ Ом·м; 2) неоднорідний, інтервал глибин від 30 до 60 км, $\rho=10$ та 1000 Ом·м; на пр. 48—51 відображено лише північну частину аномалії ізометричної форми низького опору в акваторії Чорного моря. Глибше 60 км — горизонтально-шаруватий нормальний розріз Скіфської плити, особливістю якого є наявність астеносферного шару в інтервалі глибин 110—140 км з $\rho=40$ Ом·м [Бур'янов та ін., 1985].

Розрахунки моделі детально описано в публікації [Кушнір, 2019]. Зауважимо, що максимальний період геомагнітних варіацій, який використано під час розрахунків, дорівнював 3500 с, оскільки лише у чоти-

рх пунктах за профілем Керч-3 спостереження проведено до 10 000 с. Аналіз похибок моделювання показав, що розподіл відхилень розрахованих і спостережених даних відповідає нормальному закону, а величина його дисперсії для періоду 100 с досягає 0,2, для періоду 3500 с — 0,15, тобто досягнуто високого рівня наближення (у 10 пунктах із 14). Однак подальший підбір параметрів не веде до істотного зменшення значення середньоквадратичної нев'язки.

Аналіз верхньомантії частини геоелектричної моделі. Розглянемо питання про можливі параметри об'єкта високої електропровідності в нижній частині кори та/або на астеносферних глибинах із застосуванням уявлень про глибинну будову Керченського півострова, отриманих за даними інших геофізичних методів.

У літературі є вказівки на високі значення теплового потоку в межах Керченського півострова [Кутас, 2020; Гордієнко та ін., 2004]. З огляду на уявлення про сучасну активізацію за даними [Гордієнко та ін., 2004], на сході температура на глибині 10—25 та 50—75 км змінюється від 400 до 700 °С та від 1000 до 1300 °С відповідно. Такі високі температури можуть спричинити зменшення питомого електричного опору в цьому інтервалі глибин. За якісною інтерпретацією профілю Керч-3 співвідношення рівня між головними значеннями горизонтальної і вертикальної компонент магнітного поля M_{xx} і M_{yy} засвідчує субмеридіональну орієнтацію глибинного провідника [Бурахович та ін., 2016]. Проте за комплексним геолого-геофізичним аналізом профілю DOBREFraction`99/DOBRE-2 виділено: а) зону на глибині від 30—35 до 45—57 км, що характеризується наявністю коромантії суміші; б) зону джерела теплових аномалій на глибинах від 50 до 75 км; в) зону надглибинних флюїдів на глибині більш як 75 км [Пашкевич та ін., 2018]. Наявність зон джерел теплових аномалій та підняття кромки астеносфери за геотермічною інтерпретацією даних до глибини 115 км просторово відповідає ПнКз. Підкреслимо, що глибина розміщення астеносфери за геоелектричною моделлю

не суперечить геотермічним даним.

Спеціально було розраховано тривимірну модель (на періоді геомагнітних варіацій 10 000 с) у декількох варіантах з різною глибинною будовою та зіставлено їх. На жаль, тільки на 4 пунктах із 14 є задовільні експериментальні спостереження на цьому періоді.

Було виявлено, що на періодах геомагнітних варіацій до 3500 с значення позірною опору практично не відрізняються від розрахованих для моделей, які містять глибинні геоелектричні неоднорідності з різними параметрами або не містять їх. Наприклад, одна модель мала єдину аномалію електропровідності субмеридіонального простягання на глибинах від 30 до 60 км у надрах східної частини Керченського півострова, її сумарна поздовжня провідність (S) дорівнювала 15 000 або 30 000 См. Друга модель мала кілька варіантів субширотного простягання аномалії як єдиної структури чи трьох окремих елементів у межах ПнКз на глибинах 35—75 км або це була тільки найбільш провідна її частина із $S=20000$ См, яка оточена зоною меншої провідності — $S=4000$ См, під всім Керченським півостровом та за його межами. Відповідно до розрахунків для періоду 10 000 с, нев'язка розрахованих і спостережених даних збільшується для моделей з глибинною неоднорідністю (до 0,18) порівняно з моделлю, яка не містить такого провідника (0,14). Ця різниця в інтегральних оцінках нев'язки недостатньо велика для того, щоб робити навіть якісні висновки щодо наявності чи відсутності провідника.

Тому доходимо таких висновків. З огляду на якість і кількість спостережених даних, наймовірно високу S_{oc} через локальний мозаїчний характер потужних осадових відкладів та надзвичайно високу електропровідність, $S=10\ 000$ См, незважаючи на стійко витримані у просторі та за глибиною параметри, немає змоги поліпшити узгодженість значень спостережених і модельних полів. Зазначене також не дає твердої упевненості у правильному виборі тієї або іншої моделі. Втім є підстави припустити, що в надрах все ж існує провідник.

Деталізація приповерхневої частини геоелектричної моделі. Для деталізації верхньої частини геоелектричного розрізу

було проведено роботи за методом АМТЗ у діапазоні 8—4000 Гц за трьома профілями (див. рис. 1), що перетинають Керченський

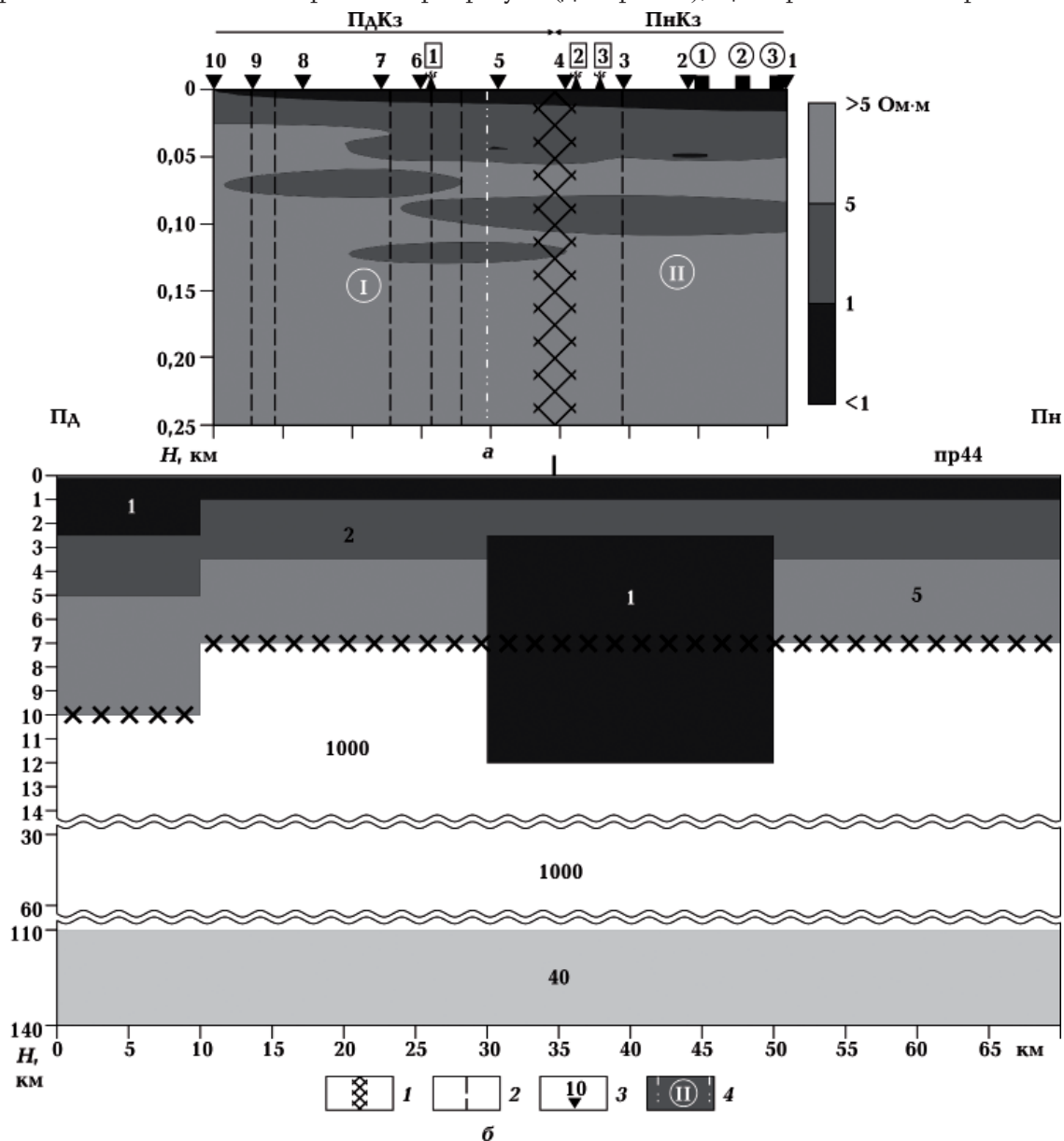


Рис. 3. Геоелектричний розріз розподілу електричного опору (Ом·м) земної кори і верхньої мантії Керченського півострова: *a* — за результатами одновимірної інверсії даних АМТЗ, профіль «Щолкинський»; *б* — за вертикальним зрізом, пр. 44 тривимірної моделі; 1 — розлом, що розділяє Гірський Крим і Скіфську плиту; 2 — регіональні розривні порушення; 3 — пункт АМТЗ, його номер; 4 — умовна межа зон геоелектричного розрізу (див. текст), номер.

Родовища заліза (цифри у кружках): 1 — Насирське, 2 — Краснокутське, 3 — Кітенське); *грязьові вулкани* (цифри у прямокутниках): 1 — Керліутський, 2 — Королевський, 3 — Насирський. Інші умовні позначення див. на рис. 1, 2.

Fig. 3. Geoelectric section of the distribution of electrical resistivity in the earth's crust and upper mantle of the Kerch Peninsula: *a* — the results of 1D inversion AMTZ of «Scholkinsky» line; *б* — line 44 of 3D model: 1 — the fault separating the Mountain Crimea and the Scythian plate; 2 — regional faults; 3 — AMTZ point; 4 — conditional border of geoelectrical zones (see the text). *Iron deposit* (numbers in circles): 1 — Nasir; 2 — Krasnokut; 3 — Kiten. *Mud volcano* (numbers in rectangle): 1 — Kerleut; 2 — Korolev; 3 — Nasir. Legend see Fig. 1, 2.

півострів з півдня на північ [Шеремет та ін., 2016].

Довжина профілю «Щолкинський» — 41,4 км. Кількість пунктів АМТЗ на профілі — 10, відстань між ними 3—7 км. Довжина профілю «Горностаївський» — 41 км. Кількість пунктів АМТЗ на профілі — 26, середня відстань між ними по профілю — 1—2 км. Довжина профілю «Керченський» — 43,8 км. Кількість пунктів АМТЗ на профілі — 13, відстань між ними 2—6 км.

Верхня частина геологічного розрізу по лініях профілів складена неоплейстоценовими утвореннями завтовшки до 15 м. Це суглинки, глини, супіски з гравієм, глини з дресвою та щебнем, лесоподібні суглинки, на півночі трапляються алевритові мули. Четвертинні відклади на геоелектричних розрізах (одновимірні інверсія) виявлені у вигляді шару, величина ρ — менш як 1 Ом·м (рис. 3—5). За профілями «Горностаївський» та «Керченський» товщина верхнього низькоомного шару витримана, за профілем «Щолкинський» — зменшується з півночі (15—17 м) на південь, практично зникає із розрізу на ПК 10. Можливо, це пов'язано зі ступенем обводнення осадових порід. Як правило, величину ρ дисперсних осадових порід визначають за гідрогеологічними умовами. Відомо, що ρ сухих пісків досягає 10^5 Ом·м, а за умови повного вологонасичення знижується до десятків омметрів, тоді як мінералізовані води зменшують його до одиниць омметрів. При цьому ρ глинистих порід майже не змінюється вище та нижче рівня ґрунтових вод через наявність зв'язаної води, тому ці відклади вирізняються найбільш низькими та витриманими значеннями ρ (1—20 Ом·м). Так, для глин морського походження характерне ρ від 1—2 до 10 Ом·м. Зазвичай з переходом від глин до суглинків, супісків, пісків і гравійних відкладів величина ρ змінюється від одиниць до сотень омметрів.

Четвертинні утворення в межах досліджуваної території залягають на неогенових глинах, алевролітах, пісках, пісковиках і вапняках. Неогенові відклади на геоелектричних розрізах проявлені шаруватим се-

редовищем з ρ 1—5 Ом·м й більше. На розрізі за профілем «Щолкинський» (рис. 3) потужність верхнього шару з $\rho=1—5$ Ом·м також зменшується з півночі (підшва на глибині 50 м) на південь (підшва на глибині 25 м). Нижче, до глибини 125 м, спостерігається розшарувате середовище — декілька витягнутих за профілем ділянок з $\rho=1\div 5$ Ом·м завтовшки 10—30 м, завдовжки 15—25 км та більше. Найбільша перемерожованість за латераллю та горизонталлю (10—25 км за профілем, ПК7—ПК4) відповідає південній межі субширотної електропровідної структури на глибинах 2,5—12 км з $\rho=1$ Ом·м (20 км, ПК5), тоді як глибинний розлом, що розділяє ПнКз та ПдКз, оконтурює зону шаруватості з півночі та перетинає її більш потужну та протяжну ділянку. Слід підкреслити, що увесь профіль поділяється на дві частини: південну (ПК10—ПК5) — за межею глибинної аномалії, північну (ПК5—ПК1) — у її межах. Саме південна частина потрапляє у Південно-Західний блок Керченського півострова — продовження Гірського Криму (його східна межа — приблизно на меридіані оз. Узунларське) [Науменко, 1977]. Незважаючи на те що південна частина вирізняється більшою перемерожованістю за ρ приповерхневих шарів, вона характеризується відсутністю підземних вод (ПК10—ПК4) [Цифровой каталог..., 2019]. Північна частина (особливо ПК3—ПК1) відповідає розташуванню залізистих осадових відкладів за палеогеографічною схемою Керченсько-Таманської області для кімерійського віку [Нестеровский, 2020]. На північній межі глибинної аномалії електропровідності відомо Кітенське родовище заліза. Така потужна глибинна розломна зона поділу ПнКз та ПдКз, що, крім того, простежується із заходу на схід системою грязьових вулканів, може створювати аномалії електропровідності внаслідок тріщинуватості, проникності та обводнення гірських порід.

На профілі «Горностаївський» (рис. 4) товщина верхньої частини геоелектричного розрізу з $\rho=1\div 5$ Ом·м приблизно витримана за простяганням — від 210 м на півдні

до 160 м на півночі. Нижче ρ збільшується до значень понад 5 Ом·м. Загалом, як і на попередньому профілі, спостерігається розшарувате середовище — декілька витягнутих за профілем ділянок з $\rho=1\div 5$ Ом·м або >5 Ом·м, завтовжки від перших метрів

до 15 м, завдовжки від 5 до майже 30 км. Умовно профіль поділено на чотири частини. Перша (I) — довжина 0—5 км, ПК83—ПК80, характеризується незначною шаруватістю середовища з різними значеннями ρ в усьому інтервалі до глибини 500 м, з пів-

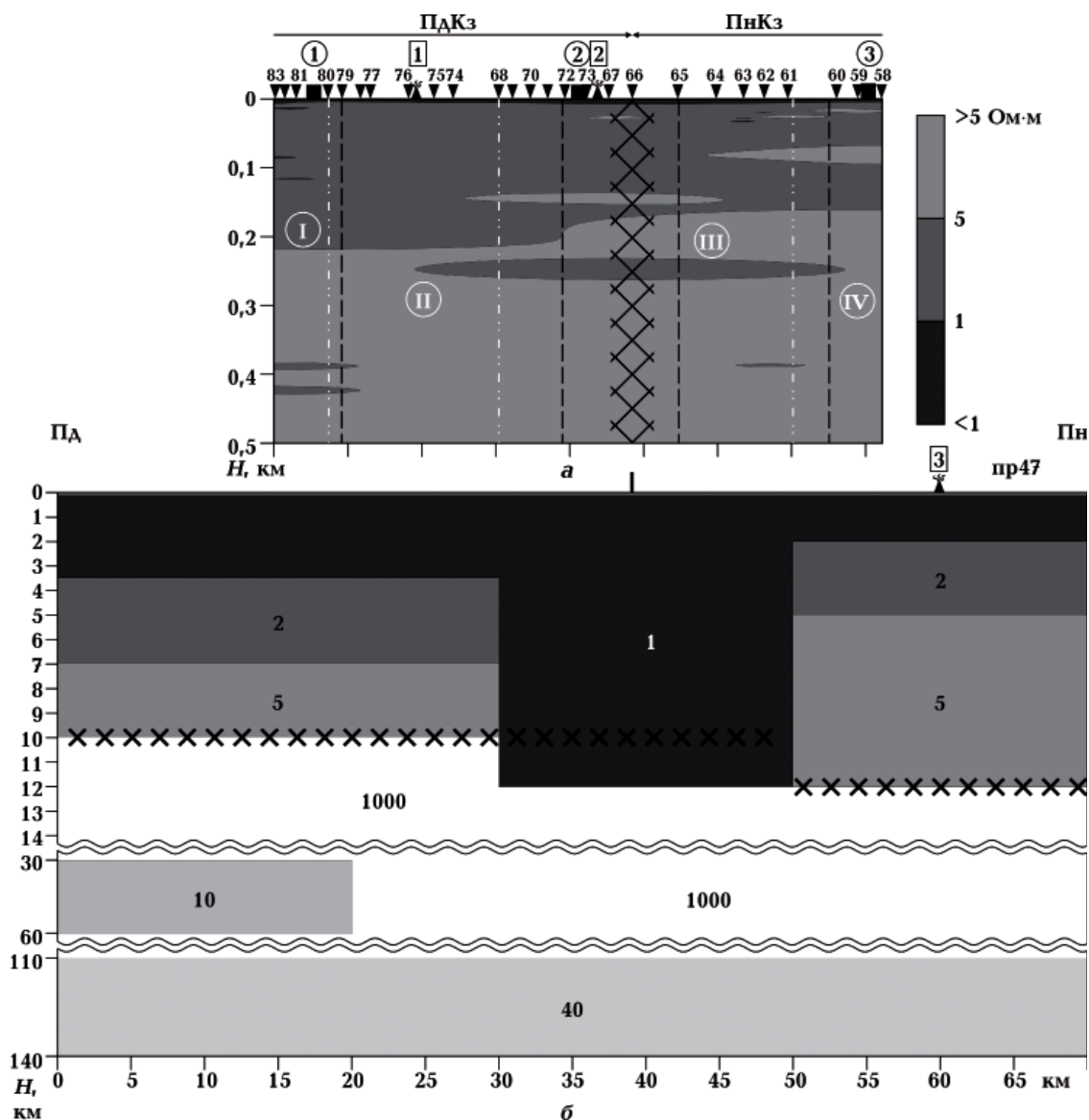


Рис. 4. Геоелектричний розріз розподілу електричного опору (Ом·м) земної кори і верхньої мантії Керченського півострова: а — за результатами одновимірної інверсії даних АМТЗ, профіль «Горностаївський»; б — за вертикальним зрізом, пр. 47 тривимірної моделі.

Родовища заліза (цифри у кружках): 1 — Узунларське; 2 — Новоселівське; 3 — Салинське. Грязьові вулкани (цифри у прямокутниках): 1 — Ак-Тубе; 2 — Новоселівський; 3 — Сююртаський. Умовні позначення див. на рис. 1—3.

Fig. 4. Geoelectric section of the distribution of electrical resistivity in the earth's crust and upper mantle of the Kerch Peninsula: а — the results of 1D inversion AMTZ of «Gornostaevsky» line; б — line 47 of 3D model.

Iron deposit (numbers in circles): 1 — Uzunlar; 2 — Novoselivka; 3 — Salin. Mud volcano (numbers in rectangle): 1 — Ak-Tube; 2 — Novoselivsky; 3 — Suurtas. Legend see Fig. 1—3.

ночі обмежується системою різноорієнтованих розломів переважно субширотного напрямку. Друга (II) частина завдовжки від 5 до 10—15 км, ПК78—ПК68, представлена витриманими за ρ трьома шарами (0—15 м, $\rho \leq 1$ Ом·м; 15—210 м, $1 < \rho < 5$ Ом·м; > 210 м $\rho \geq 5$ Ом·м). Третя (III) частина завдовжки 15—35 км, ПК69—ПК61, відображає найбільшу перемерожованість за латераллю та горизонталлю, просторово відповідає розташуванню глибинної аномалії електропровідності. Всередині її потужніші та протяжні ділянки у різних шарах перетинає глибинний розлом, що розділяє ПнКз та ПдКз (біля ПК66). Крім того, біля ПК72—ПК73 (20 км) і ПК65—ПК64 (30 км) перешарування за ρ на глибинах до 250 м можуть бути зумовлені системами локальних розломів субширотного простягання. Саме в цій частині профілю наявні декілька грязьових вулканів, які, ймовірно, можуть бути пов'язані з цими розломами (ПК67—ПК65). Інші вулкани вишикуюються із заходу на схід уздовж розлому, що оперяє, субширотного простягання; профіль перетинає його у ПК72—ПК73. Четверта (IV) частина завдовжки 35—40 км, ПК61—ПК58, характеризується перемерожованістю у верхах розрізу. На відміну від попереднього профілю тут просторова відповідність розташування залістистих осадових відкладів, за [Нестеровский, 2020], не настільки очевидна. Так, для ділянки поміж ПК66—ПК64 (III) подібний зв'язок простежується, а для ділянки ПК61—ПК58 (IV) він відсутній.

Відомі в межах профілю родовища заліза: Узунларське (в районі Узунларського озера, Узунларської втиснутої синклінали, поміж ПК81—ПК80 (I)) та Салинське (на сході поміж ПК59—ПК58 (IV)) розташовані за межами глибинної аномалії електропровідності та, на наш погляд, в електропровідних зонах різного генезису. Проте так чи інакше зберігається по всій глибині розрізу розшарованість з низькими значеннями ρ .

У межах глибинної аномалії електропровідності, по різні боки від профілю «Горностаївського», вздовж глибинного

розлому, що розділяє ПнКз і ПдКз, в однійменних втиснутих синкліналах розташовані Новоселівське та Реп'яхівське родовища заліза (останнє перетинається профілем «Керченським»). Можливо, саме виявлена глибинна аномалія електропровідності вказує на безпосередній зв'язок з каналом транспортування сопкового матеріалу та газів.

Загалом за профілем «Керченський» (рис. 5) спостерігається наближено витримана картина розподілу ρ за трьома шарами: 0—15 м, $\rho \leq 1$ Ом·м; 15—175 м, $1 < \rho < 5$ Ом·м; > 175 м, $\rho \geq 5$ Ом·м. Таке шарувате середовище ускладнюється різними, як за глибиною розташування, так і за ρ , витягнутими за профілем ділянками завтовшки від перших метрів до 50 м, завдовжки від менш як 5 до майже 30 км. Умовно профіль розділено на три частини. Перша (I), 0—15 км, ПК23—ПК19, характеризується витриманою перемерожованістю (на глибинах 280 і 420 м) за ρ нижнього шару. Згідно з результатами аналізу приповерхневої частини розрізу, у аномальній електропровідності не виділяється Правдинський розлом першого рангу. Проте за результатами 3D геоелектричного моделювання в акваторії Чорного моря та лише на незначній ділянці на південному сході Керченського півострова виявлено аномалію ізометричної форми на глибинах 30—60 км ($\rho = 10$ Ом·м). Її північно-західною межею може бути частина Правдинського розлому.

Друга (II) частина, 15—34 км, ПК19—ПК14, вирізняється специфічним перешаруванням нижнього шару (175—500 м). Глибинний розлом, що розділяє ПнКз та ПдКз, проходить поміж 20—25 км (ПК17—ПК16) та розмежовує частину II на зони: південну — вклинювання на північ перемерожованості південної частини I, та північну — витримано шаруватим розподілом ρ . Для частини II характерна наявність на глибинах 2,5—12 км аномалії електропровідності з $\rho = 1$ Ом·м. Третя (III) частина, 34—43 км, ПК14—ПК11, представлена шаруватістю з різними значеннями ρ у середньому та однорідними у верхньому та нижньому шарах.

Положення грязьових вулканів відповідає різним частинам профілю, які описуються різними параметрами: півдню — частинам II (ПК19—ПК17) і III (ПК13—ПК12). Так чи інакше, але саме пережеваність та/або наявність глибинної аномалії електропровідності вказують на іс-

нування зон тріщинуватості, проникності та обводнення гірських порід.

Ще раз підкреслимо, що у східній частині Криму глибинна електропровідна зона географічно збігається з положенням грязьових вулканів Керченсько-Таманського регіону, можливо контрольованим текто-

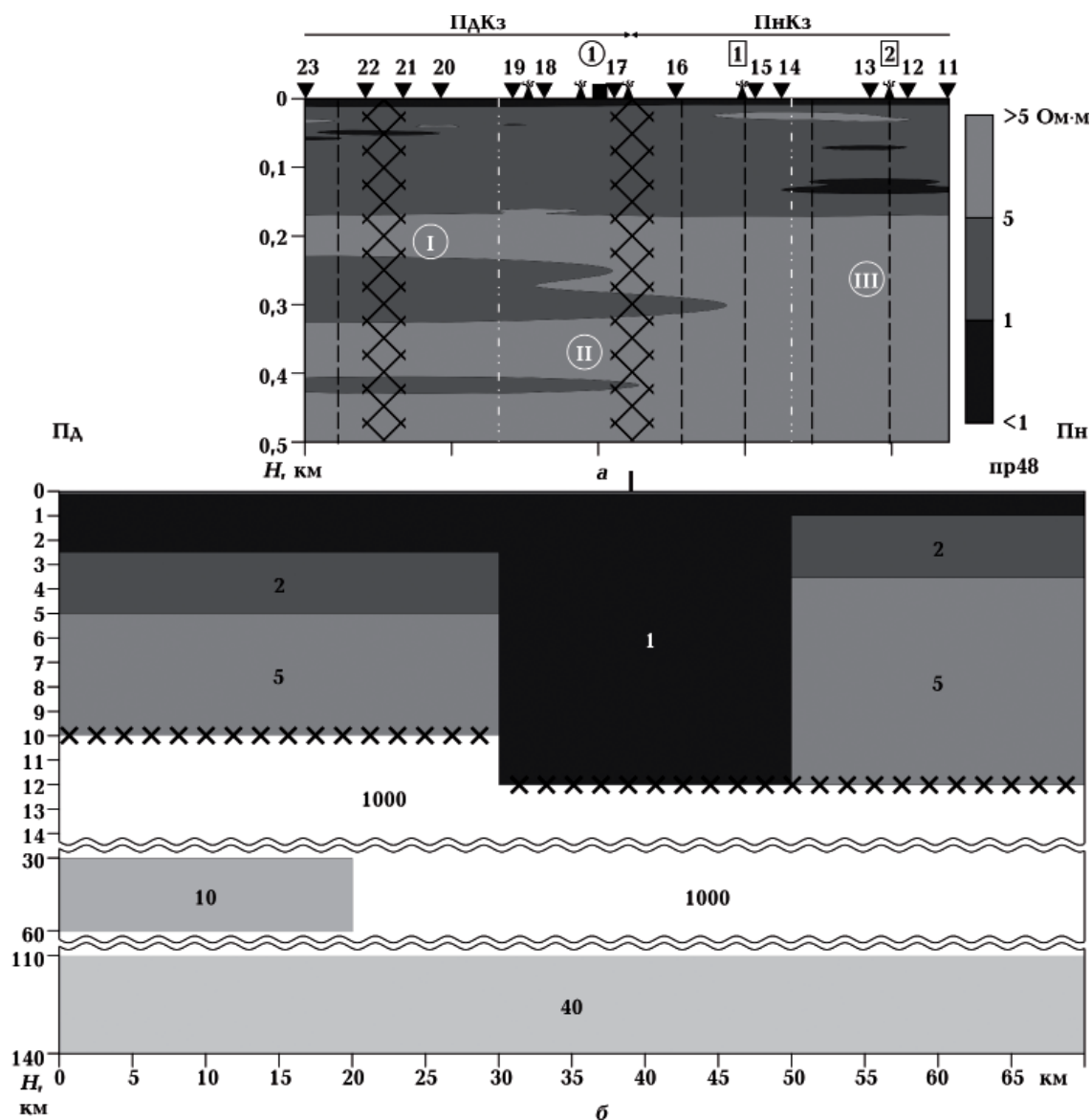


Рис. 5. Геоелектричний розріз розподілу електричного опору (Ом·м) земної кори і верхньої мантії Керченського півострова: а — за результатами одновимірної інверсії даних АМТЗ, профіль «Керченський»; б — за вертикальним зрізом, пр. 48 тривимірної моделі.

Родовища заліза (цифри у колах): 1 — Реп'яхівське. Грязьові вулкани (цифри у прямокутниках): 1 — Андріївський; 2 — Чокрацький). Умовні позначення див. на рис. 1—3.

Fig. 5. Geoelectric section of the distribution of electrical resistivity in the earth's crust and upper mantle of the Kerch Peninsula: а — the results of 1D inversion AMTZ of «Kerchensky» line; б — line 48 of 3D model.

Iron deposit (numbers in circles): 1 — Repyahiv. Mud volcano (numbers in rectangle): 1 — Andriivsky; 2 — Chokrak. Legend see Fig. 1—3.

нічними порушеннями, коренева система яких залягає на глибині 5—7 км [Юровский, 1997].

Геологічна інтерпретація геоелектричних неоднорідностей. Керченський залізорудний басейн тектонічно приурочений до Індоло-Кубанського прогину у межах витягнутої ПнКз. Басейн характеризується двома типами родовищ морських платформних осадових оолітових залізних руд кімерійського віку [Нестеровский, 2020]. Перший тип родовищ пов'язаний з великими тектонічними брахісинклінальними структурами — мульдами, другий тип — із компенсаційними прогинами в зоні розвитку грязьового вулканізму, так звані «втиснутими синкліналями».

Родовища залізних руд розміщуються в мульдах і прогинах субширотного простягання завдовжки 6—40 км і завширшки 1,5—13 км. Рудний горизонт тяжіє до морських кімерійських відкладів нижнього пліоцену і представлений пологозалягаючими пластами піщано-глинистих порід з бурими залізяками. Потужність рудних покладів — від 0,5—2 м у крайових до 25—40 м у центральних частинах мульди [Атлас..., 2001]. У регіоні розвідано понад 11 родовищ залізних руд. Найвідоміші з них: Акманайська ділянка, Катерлезька, Боксинська, Комиш-Бурунська, Киз-Аульська мульди та ін. Акманайська ділянка належить складній зоні Корсацько-Феодосійського розлому на контакті двох провідників з різними глибиною та опором [Кушнір, Бурахович, 2021]. Катерлезька, Боксинська та Комиш-Бурунська мульди розміщуються над поверхневим провідником у межах Керченсько-Чкаловського розлому.

Відомо, що пластові осадові родовища мають хомогенне походження, утворилися в умовах мілководного шельфу внаслідок випадіння заліза із колоїдних розчинів. Це оолітові, або бобові, залізні руди, представлені переважно гетитом і гідрогетитом [Гірничий..., 2004].

Головні типи руд Керченського залізорудного басейну: коричневі (складені гідроферихлоритом, феримонтморилонітом і гідрогетитом) і тютюнові (лептохлорито-

ві). Коричневі руди сформувалися у верхній частині пласта за рахунок окиснення тютюнових руд. Переважна частина руд характеризується оолітовою текстурою. Термічна обробка тютюнових руд із Керченського залізорудного басейну приводила до перетворення гетиту на магнетит з феромагнітною структурою. Для гетиту тютюнових руд характерні входження води до структури і прояв ізоморфізму $Fe^{3+} \rightarrow Al$ [Іваницький та ін., 2016].

Загалом Керченський залізорудний басейн відповідає положенню субширотної електропровідної структури на глибинах 2,5—12 км з $\rho=1$ Ом·м у межах ПнКз. У керченських залізних рудах містяться сульфіді (пірит, піротин) і сульфати (гіпс) та сірчані відклади. Вважають, що сірка привнесена підземними водами, які також багаті на арсен і фосфор. Можна припустити, що сірчані води мають глибинне походження, зокрема спільне із газовими флюїдами полігенної природи [Шнюков та ін., 2018]. Така ситуація може пояснювати підвищену електропровідність, якою характеризуються надра ПнКз.

Існує точка зору щодо зв'язку родовищ заліза керченського типу з глибинними джерелами гідротермальних розчинів [Rudmin et al., 2019; Sokol et al., 2020], яка ґрунтується на особливостях мінерального і хімічного складу руд, наявності та особливостях розподілу певних хімічних елементів (Ni, Co, Pb, Zn, Cu, Mo, As, V) і газів (метан). Корені каналу для флюїдопотoku при цьому перебувають на великих глибинах, набагато нижче підшви майкопських відкладів, з якими традиційно пов'язують джерело матеріалу для грязьового вулканізму. При цьому надлишковий тиск вуглеводневих газів, сконцентрованих у надрах, зумовлює прорив грязьобрекчії на земну поверхню [Холодов, 2012].

Висновки. У цілому верхня частина шаруватого геоелектричного розрізу Керченського півострова в інтервалі перших сотень метрів за результатами одновимірної інверсії даних АМТЗ характеризується низькими значеннями ρ . Четвертинні відклади виділяються значеннями ρ до 1 Ом·м,

верхи неогенових відкладів — до 5 Ом·м і більше.

Майже в усіх втиснутих синкліналях (Південнозахідний блок не досліджено) по всій глибині розрізу до 400 м й нижче виявлено ділянки перешарування з низькими значеннями електроопору, які, можливо, безпосередньо зв'язані з каналом транспортування сопкового матеріалу та газів.

За результатами тривимірного моделювання на схід від Корсацько-Феодосійського розлому вздовж південної частини Індоло-Кубанського прогину на глибинах від 2,5 до 12 км виявлено низькоомну аномалію ($\rho=1$ Ом·м) завширшки близько 20 км. Східна частина аномалії розташована в консолідованій земній корі та гальванічно пов'язана з поверхневими осадовими товщами, західна частина повністю знаходиться в осадових відкладах. Північна частина Південнокерченської зони та майже вся територія Північнокерченської, з можливим продовженням на Таманському півострові, проявилися в аномалії електропровідності. В цих межах вона охоплює територію Керченського залізрудного

басейну та прояви грязьового вулканізму, крім північно-західного блока півострова.

Електропровідні зони часто збігаються з розломними структурами різного порядку, більшість таких об'єктів приурочені до меж між різними тектонічними елементами, такими як Північнокерченська і Південнокерченська зони та інші. Неоднорідність корових і мантійних високопровідних шарів може бути свідченням високої проникності глибинних флюїдів у зонах контактів.

За результатами аналізу отримано очевидну закономірність зв'язку між низькоомними шаруватими приповерхневими ділянками, глибинною аномалією електропровідності у верхній частині земної кори та ймовірно високою електропровідністю гірських порід на глибинах верхньої мантії із залізрудними родовищами, а також з проявами грязьового вулканізму. Якщо такого зв'язку не спостерігається, то до нього треба ставитись, як до винятку. Щонайшвидше таку ситуацію можливо пояснити недостатньою кількістю експериментальних електромагнітних спостережень.

Список літератури

- Атлас «Геологія і корисні копалини України». Під. ред. Л. С. Галецького. Київ: УЦПТ «Геос-XXI століття», 2001. 168 с.
- Бурахович Т. К., Кушнір А. Н., Николаєв І. Ю., Шеремет Е. М., Ширков Б. І. Результати експериментальних електромагнітних досліджень Кримського регіона. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 2. С. 57—78. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i2.2016.107765>.
- Бурьянов В. Б., Гордиенко В. В., Завгородняя О. В., Кулик С. Н., Логвинов И. М. Геофизическая модель тектоносферы Украины. Киев: Наук. думка, 1985. 212 с.
- Гірничий енциклопедичний словник. Т. 3. Під. ред. В. С. Білецького. Донецьк: Східний видавничий дім, 2004. 752 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Геотермический атлас Украины. Киев: Изд. ИГФ НАН Украины, 2004. 60 с.
- Іваницький В. П., Пономаренко О. М., Брик О. Б., Дудченко Н. О., Польшин Е. В., Редько Я. В., Овсієнко В. В. Вплив термічної обробки з крохмалем руд Керченського залізрудного басейну на їхні властивості за даними мессбауєрівської спектроскопії. *Мінерал. журн.* 2016. Т. 38. № 1. С. 21—31. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.01.021>.
- Кутас Р. И. Геотектонические и геотермические условия зон флюидной и газовой разгрузки в Черном море. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 5. С. 16—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215070>.
- Кушнір А. М. Геоелектричні неоднорідності земної кори та верхньої мантії території України: Автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 2019. 38 с.
- Кушнір А. М., Бурахович Т. К. Геоелектрич-

- ні неоднорідності Кримського регіону як зони проявів сейсмічності та нафтогазоносності. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 1. 69—92. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225494>.
- Науменко П. И. Некоторые закономерности размещения рудных залежей Керченско-Таманской области в связи с особенностями ее тектонического строения. *Геол. журн.* 1977. Т. 37. Вып. 6. С. 28—37.
- Нестеровский В. А. Уникальный промышленно-генетический тип осадочных месторождений. *Геологія і корисні копалини Світового океану.* 2020. Т. 16. № 1. С. 54—68. <https://doi.org/10.15407/gpimo2020.01.054>.
- Пашкевич И. К., Русаков О. М., Кутас Р. И., Гринь Д. Н., Старостенко В. И., Яник Т. Строение литосферы по комплексному анализу геолого-геофизических данных вдоль профиля DOBREFraction'99/DOBRE-2 (ВосточноЕвропейская платформа — Восточно-Черноморская впадина). *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 5. С. 98—136. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147476>.
- Тектоническая карта Украинской ССР и Молдавской ССР. М-б 1:500 000. Гл. ред. В. В. Глушков. Киев: УкрНИГРИ, ГПО Укр-геология, 1988.
- Холодов В. Н. Грязевые вулканы: распространение и генезис. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана.* 2012. № 4(30). С. 5—27.
- Цифровой каталог государственных геологических карт РФ масштаба 1:1000000. Серия Скифская. Лист L-36. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. 979 с.
- Шеремет Е. М., Бурахович Т. К., Дудик А. М., Николаев И. Ю., Дудик С. А., Кушнир А. Н., Агаркова Н. Г. Геоэлектрические и геохимические исследования при прогнозировании углеводородов в Украине. Киев: Компринт, 2016. 489 с.
- Шнюков Е. Ф., Деяк М. А., Науменко С. П. Грязевые вулканы Керченского полуострова как потенциальные предвестники землетрясений. *Геол. журн.* 2018. № 2(363). С. 33—41. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2018.2.133455>.
- Шнюков Е. Ф., Науменко П. И., Лебедев Ю. С., Усенко В. П., Гордиевич В. А., Юханов И. С., Щирица А. С. Грязевой вулканизм и рудообразование. Киев: Наук. думка, 1971. 332 с.
- Юдин В. В. Предгорная сутура Крыма. *Геол. журн.* 1995. № 3-4. С. 56—61.
- Юровский Ю. Г. Сейсмичность и миграция флюидов Керченско-Таманского региона. *Геодинамика Крымско-Черноморского региона. Сборник материалов конференции 22—28 сентября 1996 г.* Симферополь: Изд. Крымского экспертного совета по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений, 1997. С. 133—134.
- Mackie, R. L., Smith, J. T. & Madden, T. R. (1994). Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example. *Radio Science*, 29, 923—935. <https://doi.org/10.1029/94RS00326>.
- Rudmin, M., Mazurov, A., & Banerjee, S. (2019). Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia. *Marine and Petroleum Geology*, 100, 309—325. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.023>.
- Sokol, E., Kokh, S., Kozmenko, O., Nekipelova, A., Rudmin, M., Khvorov, P., & Artemyev, D. (2020). Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: A case study of the Kamysh-Burun deposit (Azov-Black Sea iron Province). *Ore Geology Reviews*, 127, 103827. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103827>.

Geoelectric heterogeneities of the Kerch iron ore basin

I. Yu. Nikolaev¹, T. K. Burakhovych², A. M. Kushnir², Ye. M. Sheremet¹, 2021

¹M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The three-dimensional geoelectric model of the Earth's crust and upper mantle of the Kerch Peninsula has been built for the first time based on the results of experimental observations of the Earth's low-frequency electromagnetic field, carried out in 2007—2013 by the Institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine. Its physical and geological interpretation and detailing of the near-surface part were carried out according to the data of the audiomagnetotelluric sounding method to study the deep structure of the Kerch iron ore basin. To the east of the Korsak-Feodosiya fault along the southern part of the Indolo-Kuban trough (in the north of the South Kerch and almost under the entire North Kerch zones), a low-resistance anomaly ($\rho=1$ Ohm·m) was found at depths from 2.5 km to 12 km about 20 km wide. Its eastern part is located in the consolidated Earth's crust and is galvanically connected with surface sedimentary strata, while the western part is completely in sedimentary deposits. The anomaly covers the territory of the Kerch iron ore basin and occurrences of mud volcanism. The characteristics of the upper part of the layered section of the Kerch Peninsula in the interval of the first hundreds of meters were obtained from the results of one-dimensional inversion of the audiomagnetotelluric sounding data (frequency range 8—4000 Hz). It is shown that the first 15 m of the section, corresponding to Quaternary deposits, have resistivity values up to 1 Ohm·m. Below, in the Neogene sediments, the electrical resistance increases to values of 5 Ohm·m and more. Both horizontally and vertically, the distribution of resistivity values has a variable character, manifesting as a thin-layered structure with low resistivity values. Possibly, such areas have a direct connection with the channel for transporting hummock material and gases. A connection is assumed between the low-resistivity thin-layered near-surface areas, a deep anomaly of electrical conductivity in the upper part of the Earth's crust, and the likely high electrical conductivity of rocks at the depths of the upper mantle with iron ore deposits, as well as the manifestation of mud volcanism. The heterogeneity of the crustal and mantle highly conductive layers may indicate a high permeability of the contact zones for deep fluids.

Key words: crust, mantle, 3D geoelectrical model, deep and audiomagnetotelluric sounding, conductivity anomalies, mud volcanism, Kerch iron ore basin.

References

- Haletskyy, L. S. (Ed). (2001). *Geology and minerals of Ukraine. Atlas*. Kiev: Geos-XXI stolittya, 168 p. (in Ukrainian).
- Burakhovich, T.K., Kushnir, A.N., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M., & Shirkov, B.I. (2016). Results of experimental electromagnetic studies of the Crimean region. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(2), 57—78. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i2.2016.107765> (in Russian).
- Buryanov, V.B., Gordienko, V.V., Zavgorodnyaya, O.V., Kulik, S.N., & Logvinov, I.M. (1985). *Geophysical model of the tectonosphere of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, 212 p. (in Russian).
- Biletskyy V.S. (Ed.). (2004). *Mining encyclopedic dictionary*. Vol. 3. Donetsk: Skhidnyy vydavnychyy dim, 752 p. (in Ukrainian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya,

- O.V., Logvinov, I.V., Tarasov, V.N., & Usenko, O.V. (2004). *Geothermal atlas of Ukraine*. Kiev: Published by the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 60 p. (in Russian).
- Ivanitskiy, V. P., Ponomarenko, O. M., Bryk, A. B., Dudchenko, N. O., Polshyn, E. V., Red'ko, Ya. V., & Ovsienko, V. V. (2016). Effect of thermal treatment with starch of Kerch iron ores on their properties by data Mossbauer spectroscopy. *Mineralohichnyy Zhurnal*, 38(1), 21—31. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.01.021> (in Ukrainian).
- Kutas, R. I. (2020). Geotectonic and geothermal conditions of the gas discharge zones in the Black Sea. *Geofizicheskij Zhurnal*, 42(5), 16—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215070> (in Russian).
- Kushnir, A. M. (2019). Geoelectrical heterogeneities of the crust and upper mantle of the territory of Ukraine. *Doctor's thesis*. Kyiv, 38 p. (in Ukrainian).
- Kushnir, A. M., & Burakhovich, T. K. (2021). Geoelectrical inhomogeneities of the Crimean region as the seismicity and oil-gas potential zones. *Geofizicheskij Zhurnal*, 43(1), 69—92. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225494> (in Ukrainian).
- Naumenko, P. I. (1977). Some regularities of placement of ore deposits of Kerch and Tamansky area in connection with features of its tectonic building. *Geologicheskij Zhurnal*, 37(6), 28—37 (in Russian).
- Nesterovskiy, V. A. (2020). An unique industrial-genetic type of sedimentary deposits. *Heolohiya i korysni kopalyny Svitovoho okeanu*, 16(1), 54—68. <https://doi.org/10.15407/gpi-mo2020.01.054> (in Russian).
- Pashkevich, I. R., Rusakov, O. M., Kutas, R. I., Gryn, D. N., Starostenko, V. I., & Janik, T. (2018). Lithospheric structure based on integrated analysis of geological-geophysical data along the DOBRE fraction '99/DOBRE-2 profile (the East European Platform — the East Black Sea Basin). *Geofizicheskij Zhurnal*, 40(5), 98—136. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147476> (in Russian).
- Glushkov, V. V. (Ed.). (1988). *Tectonic Map of the Ukrainian SSR and the Moldavian SSR*. 1:500 000. Kiev: UkrNIGRI, GAP Ukrgeologiya (in Russian).
- Kholodov, V. N. (2012). Mud volcanoes: distribution and genesis. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Mirovogo okeana*, (4), 5—27 (in Russian).
- Digital catalog of the state geological maps of the Russian Federation of scale 1:1 000 000. Scythian series. Sheet L-36. Explanatory note.* (2019). St. Petersburg: Publishing house VSEGEI, 979 p. (in Russian).
- Sheremet, E. M., Burakhovich, T. K., Dudik, A. M., Nikolaev, I. Yu., Dudik, S. A., Kushnir, A. N., & Agarkova, N. G. (2016). *Geoelectric and geochemical studies in predicting hydrocarbons in Ukraine*. Kiev: Komprint, 489 p. (in Russian).
- Shnyukov, E. F., Deyak, M. A., & Naumenko, S. P. (2018). Mud volcanoes of the Kerch peninsula as potential precursors of the earthquakes. *Heolohichnyy Zhurnal*, (2), 33—41. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2018.2.133455> (in Russian).
- Shnyukov, E. F., Naumenko, P. Y., Lebedev, Yu. S., Usenko, V. P., Hordyevych, V. A., Yukhanov, Y. S., & Shchyrytsa, A. S. (1971). *Mud volcanism and ore formation*. Kiev: Naukova Dumka, 332 p. (in Russian).
- Yudin, V. V. (1995). Predgornayasutura of the Crimea. *Geologicheskij Zhurnal*, (3-4), 56—61 (in Russian).
- Yurovskiy, Yu. G. (1997). Seismicity and fluid migration of the Kerch-Taman region. *Geodynamics of the Crimean-Black Sea region. Proceedings of the conference 22—28 September 1996* (pp. 133—134). Simferopol: Edition of the Crimean Expert Council on Seismic Hazard Assessment and Earthquake Prediction (in Russian).
- Mackie, R. L., Smith, J. T. & Madden, T. R. (1994). Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example. *Radio Science*, 29, 923—935. <https://doi.org/10.1029/94RS00326>.
- Rudmin, M., Mazurov, A., & Banerjee, S. (2019). Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia. *Marine and Petroleum Geology*, 100, 309—325. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.023>.

Sokol, E., Kokh, S., Kozmenko, O., Nikipelova, A., Rudmin, M., Khvorov, P., & Artemyev, D. (2020). Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones:

A case study of the Kamysh-Burun deposit (Azov-Black Sea iron Province). *Ore Geology Reviews*, 127, 103827. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103827>.

Геоэлектрические неоднородности Керченского железорудного бассейна

И. Ю. Николаев¹, Т. К. Бурахович², А. Н. Кушнир², С. М. Шеремет¹, 2021

¹Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. М. П. Семененко НАН Украины, Киев, Украина

²Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Впервые для Керченского полуострова построена трехмерная геоэлектрическая модель земной коры и верхней мантии по результатам экспериментальных наблюдений низкочастотного электромагнитного поля Земли, выполненных в 2007—2013 гг. институтами НАН Украины; проведены ее физико-геологическая интерпретация и детализация приповерхностной части по данным метода аудиоманнитотеллурического зондирования для изучения глубинного строения Керченского железорудного бассейна. К востоку от Корсакско-Феодосийского разлома вдоль южной части Индоло-Кубанского прогиба (на севере Южно-Керченской и почти под всей Северо-Керченской зоной) на глубинах от 2,5 до 12 км обнаружена низкоомная аномалия ($\rho=1$ Ом·м) шириной около 20 км. Ее восточная часть расположена в консолидированной земной коре и гальванически связана с поверхностными осадочными толщами, западная часть полностью находится в осадочных отложениях. Аномалия охватывает территорию Керченского железорудного бассейна и проявления грязевого вулканизма. Характеристика верхней части слоистого разреза Керченского полуострова в интервале первых сотен метров получена по результатам одномерной инверсии данных аудиоманнитотеллурического зондирования (диапазон частот 8—4000 Гц). Показано, что первые 15 м разреза, соответствующие четвертичным отложениям, имеют значения электросопротивления до 1 Ом·м. Ниже, в неогеновых отложениях, электросопротивление повышается до значений 5 Ом·м и более. Как по горизонтали, так и по вертикали распределение значений электросопротивления изменчиво, что проявляется в тонкослоистой структуре с его низкими значениями. Возможно, такие участки непосредственно связаны с каналом транспортировки сопочного материала и газов. Предполагается связь между низкоомными тонкослоистыми приповерхностными участками, глубинной аномалией электропроводности в верхней части земной коры и, вероятно, высокой электропроводностью горных пород на глубинах верхней мантии с железорудными месторождениями, а также с проявлением грязевого вулканизма. Неоднородность коровых и мантийных высокопроводящих слоев может свидетельствовать о высокой проницаемости глубинных флюидов зон контактов.

Ключевые слова: земная кора, мантия, 3D геоэлектрическая модель, глубинные и аудиоманнитотеллурические зондирования, аномалии электропроводности, грязевой вулканизм, Керченский железорудный бассейн.