

illustrations presented in the paper. The obtained data can be used for developing and improving the technologies for biogenic magnetite analogue synthesis. The paper could be of use to teachers, students, and researchers interested in biomineralogy and magnetic nanoparticle synthesis.

Keywords: biogenic magnetite, co-precipitation method, synthesis, nanoparticles, X-ray analysis, magnetometry.

И. Герасимец, студ., Тел.: +38096 642 33 28, Herasimets@i.ua,  
 О. Петренко, студ., Тел.: +38097 664 31 83, Ksuha\_Petrenko@ukr.net,  
 Т. Савченко, студ., Тел.: +38068 034 17 10, Konfetka-ts@ukr.net,  
 Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
 Геологический факультет, ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина  
 Ю. Карданец, асп., А. Гречановский, ст. науч. сотрудник,  
 Н. Дудченко, ст. науч. сотрудник  
 Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. М.П. Семененко НАН Украины,  
 пр. Паладіна, 34, м. Київ-142, Україна, 03680

## СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ БИОГЕННОГО МАГНЕТИТА

Статья посвящена вопросу синтеза аналогов биогенного магнетита. Разработка технологий создания синтетических аналогов магнитных минералов, локализованных в тканях живых организмов, в том числе и в организме человека, особенно актуальна в условиях развития науки и медицины. Магнетит является одним из физиогенных биоминеральных образований в живых организмах, формирование которого определяется генетически. В живых организмах, в организме человека биогенный магнетит отвечает за перенос и запас железа. Такие организмы как перелетные птицы, пчелы, рыбы благодаря наличию магнетита ориентируются в пространстве ("магнитный компас"), поэтому из многих известных биоминералов магнетит всегда привлекает к себе широкий интерес.

В статье рассмотрен синтез наночастиц биогенного магнетита под воздействием магнитного поля и ультразвука. Описан химический метод со-осаждения, как один из самых простых методов синтеза магнитных наночастиц. Образцы наночастиц были синтезированы методом со-осаждения солей  $Fe^{3+}$  и  $Fe^{2+}$  в щелочной среде под воздействием ультразвука и магнитного поля и исследованы методами магнитометрии и рентгенофазового анализа. Основное внимание авторы статьи акцентируют на исследовании магнитных свойств и определении размера кристаллитов полученного минерала. В результате проведенных исследований авторами установлена и проанализирована зависимость размера кристаллитов от различных условий синтеза. Полученные экспериментальные результаты показали, что в условиях магнитного поля размер синтезированных наночастиц увеличивается, под воздействием ультразвука он увеличивается существенно. Установлено, что с увеличением размера наночастиц увеличивается намагниченность образцов. Представленные в статье таблицы и иллюстрации предоставляют информацию о полученных результатах исследований. Полученные данные могут быть использованы при синтезе аналогов биогенного магнетита.

Статья может быть полезной для преподавателей, студентов, работников медицинской отрасли, для всех, кто интересуется биоминералогией и вопросами синтеза магнитных наночастиц.

Ключевые слова: биогенный магнетит, метод со-осаждения, синтез, наночастицы, рентгенофазовый анализ, магнитометрия.

## ГЕОФІЗИКА

УДК 550.83:552.1:537

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.  
 E-mail: vsa@univ.kiev.ua,

Д. Онищук, асп.

E-mail: boenerges@ukr.net,

М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.

E-mail: mvreva@gmail.com,

В. Онищук, канд. геол. наук, асист.

E-mail: vitus16@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
 Геологічний факультет, вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

## КОМПЛЕКСНІ ПЕТРОЕЛЕКТРИЧНІ МОДЕЛІ ВАПНЯКІВ ДЕВОНУ ТА ПІСКОВИКІВ КЕМБРІЮ ДОБРОТВІРСЬКОЇ ПЛОЩІ ВОЛИНО-ПОДІЛЛЯ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, І.М. Корчагіним)

В статті розглядаються результати та особливості методики петроелектричних досліджень при вивченні складнобудованих карбонатних та теригенних колекторів. Наведені результати визначення електричних параметрів та їх зв'язок з емпіричними властивостями вапняків девону та пісковиків кембрію Добротвірської площі Волино-Поділля. Метою проведених досліджень була розробка та створення петроелектричних моделей порід-колекторів, як основи комплексного аналізу їх електричних параметрів та зв'язків з емпіричними властивостями. Відомості про питомий електричний опір порід-колекторів використовуються для уточнення меж його зміни для окремих типів і груп порід; виділення окремих стратиграфічних горизонтів, розрізів та фацій; встановлення характеру його залежності від мінерального складу, структури порового простору, співвідношення фаз речовини, частоти і напруженості електричного поля; виявлення характеру зміни електричного опору при епігенетичному перетворенні та метаморфічних змінах гірських порід. Матеріали лабораторних досліджень питомого електричного опору порід використовуються при інтерпретації результатів електрометричних методів досліджень свердловин та польової електророзвідки. Комплекс петрофізичних лабораторних досліджень включає визначення: густини досліджених порід (сухих та насичених моделлю пластової води); відкритої пористості (методами насичення азотом та моделлю пластової води); коефіцієнта залишкового водонасичення (методом центрифугування); проникності (методом стаціонарної фільтрації азоту); інтервального часу (швидкості поведовжніх пружних хвиль) та питомого електричного опору. В процесі лабораторних робіт визначається питомий електричний опір зразків порід при різних умовах (сухі, неповністю та повністю насичені розчином-імітатором пластового флюїду) в атмосферних умовах, а також в умовах наближених до пластових. В результаті виконаних лабораторних досліджень вивчені петроелектричні параметри пісковиків кембрію та вапняків девону Добротвірської перспективної площі, встановлені емпіричні кореляційні залежності між петроелектричними параметрами та емпіричними властивостями досліджених порід, що слугують основою геологічної інтерпретації геофізичних даних. Ці залежності апроксимуються у більшості випадків степеневою функцією. Аналіз наведених даних свідчить про те, що електрометричні методи є потужним засобом як лабораторних так і польових досліджень, досить ефективні і надають широку та цінну інформацію про властивості порід.

Ключові слова: дослідження ядра, фільтраційно-емісійні параметри, електричні параметри, поровий простір, кореляційні залежності, пісковик, вапняк, пористість, електричний опір, тиск, проникність, петроелектричні параметри.

**Вступ.** Комплексні лабораторні петрофізичні дослідження є основою для визначення кореляційних зв'язків між емпіричними властивостями та даними свердловинних та польових геофізичних методів. Ці зв'яз-

ки є досить складними і потребують ретельного вивчення. Питомий електричний опір ( $\rho$ ) є одним із найбільш інформативних параметрів при визначенні геоелектричних властивостей гірських порід. Електричний опір гірсь-

ких порід залежить від: речовинного складу та текстури породи; структури емнісного простору; її нафто-, газо- та водонасиченості; коефіцієнта пористості; мінералізації пластових вод; температури та тиску [1-9].

**Метою** проведених досліджень була розробка та створення петроелектричних моделей порід-колекторів, як основи комплексного аналізу їх електричних параметрів та зв'язків з емнісно-фільтраційними властивостями. Відомості про питомий електричний опір порід-колекторів використовуються для уточнення меж його зміни для окремих типів і груп порід; виділення окремих стратиграфічних горизонтів, розрізів та фацій; встановлення характеру його залежності від мінерального складу, структури порового простору, співвідношення фаз речовини, частоти і напруженості електричного поля; виявлення характеру зміни електричного опору при епігенетичному перетворенні та метаморфічних змінах гірських порід. Матеріали лабораторних досліджень питомого електричного опору порід використовуються при інтерпретації результатів електрометричних методів досліджень свердловин та польової електророзвідки.

В статті представлені результати та особливості лабораторних петроелектричних досліджень вапняків девону та пісковиків кембрію перспективної на вуглеводні Добротвірської площі (св. Добротвірська-1, інтервали 1729–1831 та 3236–3702 м). Площа розташована в північній частині східного борту Львівського палеозойського прогину.

Породи з досліджених інтервалів представлені переважно вапняковими відкладами девону та різнозернистими пісковиками кембрію.

Експериментальні дослідження. Комплекс петрофізичних лабораторних досліджень включав визначення: густини досліджених порід (сухих та насичених моделлю пластової води); відкритої пористості (методами насичення азотом та моделлю пластової води); коефіцієнта залишкового водонасичення (методом центрифугування); проникності (методом стаціонарної фільт-

рації азоту); інтервального часу (швидкості повздовжніх пружних хвиль) та питомого електричного опору. В процесі лабораторних робіт визначався питомий електричний опір зразків порід при різних умовах (сухі, неповністю та повністю насичені розчином-імітатором пластового флюїду) в атмосферних умовах, а також в умовах наближених до пластових.

Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків ядра виконані при температурі 20оС за допомогою цифрового тераомметра С.А.6547 та прецезійного цифрового RLC-метра МНС-1100, які дозволяють виконувати високоточні вимірювання електричного опору та ємності в широкому діапазоні частот з цифровим записом на ЕОМ за спеціальною програмою. Циліндричні зразки при вимірюванні вставлялися в спеціальний кернотримач з електродами, що не поляризуються [1, 2, 4]. Для вимірювання зразків насичених розчином NaCl (M=90 г/л та 120 г/л) застосовувався RCL-метр МНС-1100. З метою визначення залежності петрофізичних параметрів від ступеню водонасиченості (а отже газонафтонасиченості) порід виконані дослідження зміни питомого електричного опору при відгонці води на центрифугі ОС-6М. Петроелектричні дослідження при центрифугуванні виконувались шляхом серії вимірювань електричного опору насичених зразків моделлю пластової води: до центрифугування та після центрифугування при режимах відгонки від 1000 до 6000 об/хв з кроком 1000 об/хв, тиск витіснення води змінюється від 0,2 до 1,00 МПа. (7 циклів вимірювань). Паралельно визначалися коефіцієнт водонасичення та швидкість пружних хвиль. Середня відносна похибка визначення електричного опору склала 2,5%.

Аналіз даних. В результаті виконаних лабораторних петрофізичних досліджень визначено фільтраційно-емнісні та електричні параметри основних типів порід, межі змін яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

№ з/п	Порода	Вік	Значення параметра	Густина, кг/м <sup>3</sup>		Відкрита пористість, %		Проникність, фм <sup>2</sup>	Коеф. залишк. водонас.	Питомий електричний опір, Ом·м		Відносний опір
				сухі	насич. NaCl	азот	насич. NaCl			сухі	нас. NaCl	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Вапняки	D	min	2645	2654	0,008	0,005	0,002	0,330	865370	83,9	579
2	Вапняки	D	max	2982	2833	0,015	0,008	0,016	0,770	27687320	91,1	629
3	Вапняки	D	серед	2770	2754	0,010	0,006	0,007	0,572	14276340	87,5	604
4	Пісковики	Є	min	2518	2567	0,009	0,004	0,002	0,320	319200	9,7	83
5	Пісковики	Є	max	2750	2754	0,050	0,046	0,068	0,900	41967670	29,7	255
6	Пісковики	Є	серед	2620	2641	0,025	0,020	0,019	0,613	15733100	19,6	168

За результатами лабораторних вимірювань встановлено, що питомий електричний опір сухих екстрагованих зразків (питомий електричний опір мінерального скелету) має значні варіації викликані неоднорідностями у текстурі порід, як для вапняків, так і пісковиків. Цей параметр змінюється від 319200 до 41967670 Ом·м при середньому значенні 15733100 Ом·м (пісковики) та від 865370 до 276873200 Ом·м при середньому значенні 14276340 Ом·м (вапняки). Питомий електричний опір зразків порід насичених моделлю пластової рідини (розчин NaCl) змінюється від 9,7 до 29,7 Ом·м при середньому значенні 19,6 Ом·м (пісковики) та від 83,9 до 91,1 Ом·м при середньому значенні 87,5 Ом·м (вапняки).

Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що пісковики мають діапазон зміни відносного електричного опору від 83 до 255 при середньому значенні 168. Відповідні цьому зміни коефіцієнта пористості складають від 0,004 до 0,046 при середньому значенні 0,020.

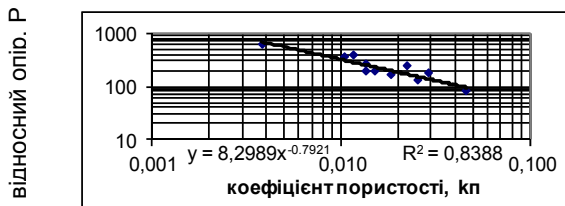
Для вапняків діапазон зміни відносного електричного опору складає від 579 до 629 при середньому значенні 604, а коефіцієнта пористості – від 0,005 до 0,008 при середньому значенні 0,006.

В результаті виконаних лабораторних досліджень побудовані кореляційні залежності (рис. 1а, 1б) між коефіцієнтом пористості ( $k_p$ ) і відносним електричним опором (P) типу  $P = a \cdot k_p^{-m}$  – рівняння Арчі-Дахнова для пісковиків і вапняків, відповідно, де  $a$  – постійний коефіцієнт,  $m$  – структурний показник.

Рівняння Арчі-Дахнова мають вигляд:  $P = 8,299 \cdot k_p^{-0,792}$  при  $R^2=0,84$  (пісковики),  $P = 1,192 \cdot k_p^{-1,162}$ , при  $R^2=0,85$  (вапняки), де  $P = \rho_{пв} / \rho_{в}$ ,  $\rho_{пв}$  – питомий електричний опір повністю водонасичених порід,  $\rho_{в}$  – питомий електричний опір пластової води.

Для вапняків Добротвірської площі, коефіцієнт  $a$  складає 1,192, а структурний показник  $m$  – 1,162. Ці параметри

для пісковиків мають значення, відповідно, 8,299 і 0,792,



а

що різко відрізняються від значень для вапняків.



б

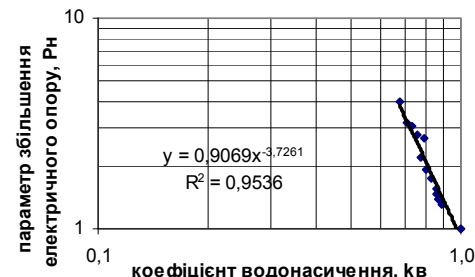
Рис. 1. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ( $k_p$ ) і відносним електричним опором ( $P$ ) – рівняння Арчі-Дахнова (лабораторні умови): а – пісковики, б – вапняки

Шляхом експериментальних лабораторних досліджень встановлено залежність петрофізичних параметрів від ступеню водонасиченості порід. Водонасиченість порід змінювалась шляхом центрифугування за допомогою центрифуги ОС-6М. При цьому виконувалась серія електрометричних вимірювань. В результаті цих досліджень встановлені кореляційні залежності типу  $P_H = b \cdot k_e^{-n}$  – параметра збільшення електричного опору ( $P_H$ ) від коефіцієнта водонаси-

чення ( $k_e$ ) для досліджених порід. Кореляційні залежності мають вигляд: для пісковиків –  $P_H = 1,079 \cdot k_e^{-1,052}$ , при  $R^2=0,9$ , для вапняків –  $P_H = 0,907 \cdot k_e^{-3,726}$  при  $R^2=0,95$ , де –  $P_H = \rho_{нв}/\rho_{пв}$ ,  $\rho_{нв}$  – питомий електричний опір неповністю водонасичених порід,  $\rho_{пв}$  – питомий електричний опір повністю водонасичених порід. Ці кореляційні залежності представлені на рис. 2а та 2б.



а



б

Рис. 2. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасичення ( $k_v$ ) та параметром збільшення електричного опору ( $P_H$ ): а – пісковики, б – вапняки

Аналіз отриманих даних показує, що пісковики мають діапазон зміни параметра збільшення електричного опору від 1 до 3,47 при середньому значенні 1,38. Відповідний цьому діапазон зміни коефіцієнта водонасичення складає від 1 до 0,35 при середньому значенні 0,81. Для вапняків діапазон зміни  $P_H$  складає від 1 до 4 при середньому значенні 2,09, а коефіцієнта водонасичення – від 1 до 0,68 при середньому значенні 0,82.

Для досліджених порід коефіцієнт  $b$  в кореляційному рівнянні типу  $P_H = b \cdot k_e^{-n}$ , що виражає зв'язок між коефіцієнтом водонасичення і параметром збільшення електричного опору, змінюється від 0,907 (вапняки) до 1,079 (пісковики), а показник змочуваності  $n$  від 1,052 (пісковики) до 3,726 (вапняки). За параметром  $b$  досліджені породи слабо диференційовані, а за показником змочуваності мають значну диференціацію.

На сучасному етапі у зв'язку зі збільшенням глибини свердловин, для кількісної інтерпретації каротажних діаграм важливе значення мають експериментальні дані про залежність електричного опору осадових порід від тиску.

Вперше залежність опору порід-колекторів від тиску була вивчена Феттом [9] на 20 зразках пісковика насичених розчином хлористого натрію. Для всіх зразків спостерігалось зростання питомого опору, а отже і відносного електричного опору  $P$  з підвищенням тиску.

Дослідження впливу тиску на електричний опір гірських порід розвивається в двох напрямках. Перший напрямок пов'язаний з вирішенням задач промислової геофізики, головним чином для встановлення залежності між тиском і електричним опором (відносним електричним опором) порід-колекторів. При цьому тиск змінюється від атмосферного до 100 МПа. Для другого напрямку (великої геофізики) потрібні значення елект-

ричного опору глибинних гірських порід, для яких тиск складає до декількох десятків тисяч МПа.

Основну роль в процесі збільшення електричного опору при збільшенні тиску відіграють пори і мікротріщини, обсяг яких визначається вмістом глинистого матеріалу. Було встановлено, що пористість змінюється значно менше, ніж проникність та електричний опір, що може спостерігатися тільки при закритті або зменшенні перерізу малих пор.

Для оцінки питомого електричного опору порід в пластових умовах виконані комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000 при зміні тиску від атмосферного до 59 МПа. В результаті аналізу отриманих даних визначено залежність середнього значення коефіцієнта збільшення питомого електричного опору ( $Q$ ) від тиску ( $p$ ) для пісковиків, що виражається поліномом 2 порядку:  $Q = -1 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 6,29 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1,0412$ , при  $R^2=0,998$ . Графік цієї залежності представлений на рис. 3.

Аналіз отриманих даних показує, що пісковики мають діапазон зміни коефіцієнта збільшення опору від 1 до 4,3 при збільшенні всібчного тиску від атмосферного до 59 МПа. При цьому графік кореляційної залежності  $Q=f(p)$  монотонно зростає в усьому діапазоні тисків. У зв'язку з підвищеною крихкістю зразків вапняків, виконати їх дослідження під тиском не вдалося.

Отримані дані при вимірюваннях під тиском дали можливість оцінити значення питомого електричного опору для досліджених порід в пластових умовах. За матеріалами петроелектричних досліджень при високих тисках встановлена залежність між коефіцієнтом пористості ( $k_{пл}$ ) та параметром пористості ( $P_{пл}$ ) в пластових умовах. Визначене рівняння Арчі-Дахнова для пісковиків кембрію має вигляд (рис. 4):  $P_{пл} = 5,394 \cdot k_{пл}^{-1,093}$ , при  $R^2=0,91$ .

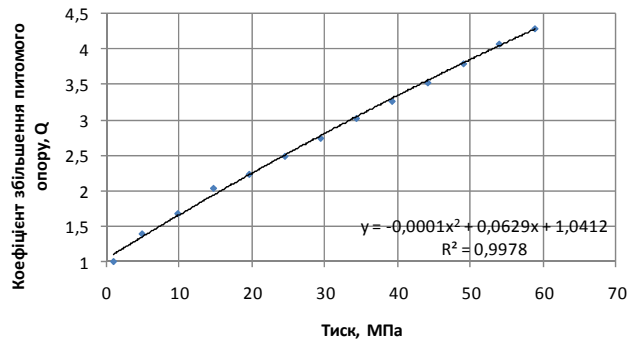


Рис. 3. Кореляційна залежність коефіцієнта збільшення питомого електричного опору (Q) від тиску (p) для пісковиків кембрію

Шляхом вимірювання електричного опору за "напластуванням" і вхрест "напластування" виконана оцінка електричної анізотропії пісковиків. Коефіцієнт електричної анізотропії  $\lambda$  визначається за допомогою формули:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_l}}$$

де  $\rho_n$ ,  $\rho_l$  – питомий електричний опір вхрест і за "напластуванням", відповідно.

В результаті аналізу отриманих даних встановлено, що коефіцієнт анізотропії сухих екстрагованих пісковиків змінюється від 1,03 до 1,11 при середньому значенні 1,07. Коефіцієнт ані-

зотропії пісковиків, насичених розчином NaCl, змінюється від 1,07 до 1,2 при середньому значенні 1,14.

Комплексні петроелектричні моделі пісковиків кембрію та вапняків девону визначались на основі аналізу всієї сукупності матеріалів петрофізичних досліджень. Комплексна петроелектрична модель в даній роботі представляється у вигляді геоелектричної інформації та кореляційних залежностей між петроелектричними параметрами та фізичними властивостями досліджених порід Добротвірської площі, що зведені в табл. 2.

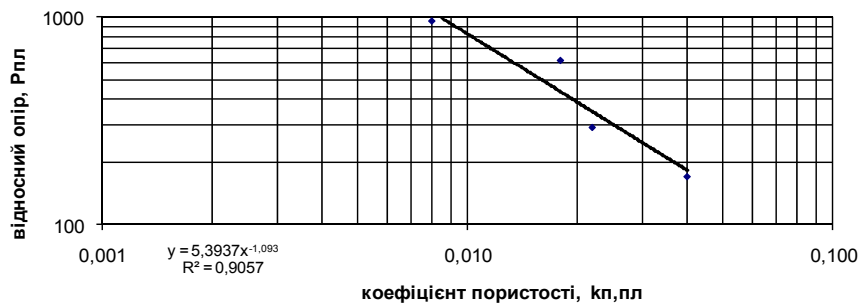


Рис. 4. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ( $k_{п, пл}$ ) та параметром пористості ( $P_{пл}$ ) в пластових умовах для пісковиків кембрію.

Таблиця 2

Комплексні петроелектричні моделі пісковиків кембрію та вапняків девону Добротвірської площі

№ з/п	Петроелектричний параметр/ Кореляційна залежність	Межі зміни параметра (середнє)/ Кореляційне рівняння (коефіцієнт кореляції)	
		Пісковики	Вапняки
1	Питомий електричний опір сухих екстрагованих порід	319200–41967670 Ом·м (15733100 Ом·м)	865370–27687320 Ом·м (14276340 Ом·м)
2	Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової води	9,7–29,7 Ом·м (19,6 Ом·м)	83,9–91,1 Ом·м (87,5 Ом·м)
3	Відносний електричний опір (P) при лабораторних умовах	83–255 (168)	579–629 (604)
4	Відносний електричний опір (P) при пластових умовах	182–1056 (502)	–
5	Кореляційна залежність Арчі-Дахнова (лабораторні умови)	$P = 8,299 \cdot k_n^{-0,792}$ ( $R^2=0,84$ )	$P = 1,192 \cdot k_n^{-1,162}$ ( $R^2=0,85$ )
6	Кореляційна залежність Арчі-Дахнова (пластові умови)	$P_{пл} = 5,394 \cdot k_{п,пл}^{-1,093}$ ( $R^2=0,91$ )	–
7	Коефіцієнт електричної анізотропії сухих екстрагованих порід	1,03–1,11 (1,07)	–
8	Коефіцієнт електричної анізотропії порід, насичених пластовою водою	1,07–1,2 (1,14)	–
9	Параметр збільшення електричного опору ( $P_H$ )	1–3,47 (1,38)	1–4 (2,09)
10	Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості ( $k_s$ ) та параметром збільшення електричного опору ( $P_H$ )	$P_H = 1,079 \cdot k_s^{-1,052}$ ( $R^2=0,9$ )	$P_H = 0,907 \cdot k_s^{-3,726}$ ( $R^2=0,95$ )
11	Кореляційна залежність коефіцієнта збільшення питомого опору порід (Q) від тиску (p)	$Q = -1 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 6,29 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1,0412$ ( $R^2=0,99$ )	–
12	Коефіцієнт збільшення електричного опору при збільшенні всебічного тиску від атмосферного до 59 МПа	1–4,3 (3,2)	–

**Висновки.** За даними петрографічних досліджень зразків керну св. Добровірска-1 визначено, що за складом вони відносяться до вапняків девону та пісковиків кембрію. Зустрічаються включення глинистого матеріалу, сидериту, вулфікація та піритизація.

В результаті виконаних лабораторних досліджень вивчені петроелектричні параметри пісковиків кембрію та вапняків девону Добровірської перспективної площі, встановлені емпіричні кореляційні залежності між петроелектричними параметрами та ємкісно-фільтраційними властивостями досліджених порід, що слугують основою геологічної інтерпретації геофізичних даних. Ці залежності апроксимуються у більшості випадків степеневу функцією.

На базі аналізу виконаних петроелектричних досліджень, всієї наявної геолого-геофізичної інформації визначено комплексні петроелектричні моделі досліджених порід. Аналіз розроблених комплексних петроелектричних моделей пісковиків кембрію та вапняків девону показує, що вони суттєво розрізняються за електричними параметрами. Розробка таких моделей для різних типів порід може бути цінним інструментом петрофізичних досліджень.

Аналіз наведених даних свідчить про те, що електрометричні методи є потужним засобом як лабораторних так і польових досліджень, досить ефективні і надають широкую та цінну інформацію про властивості порід. Петроелектричні дослідження займають важливе місце у петрофізичному комплексі і широко застосовуються при вивченні фізичних властивостей гірських порід з метою встановлення їх складу, структури і стану, а також при вирішенні різноманітних завдань пошуків і розвідки родовищ корисних копалин, особливо у нафтогазовій геології.

В подальшому, комплекс петроелектричних досліджень гірських порід, раціонально було б доповнити вивченням діелектричної проникності, тангенса кута діелектричних втрат порід-колекторів, оцінати інформативність геоелектричних параметрів, що контролюють зміни електричного опору сухих екстрагованих зразків з часом при пропусканні постійного струму та встановити

кореляційні залежності їх з даними геофізичних досліджень свердловин.

#### Список використаних джерел:

1. Вижва С.А., Рева М.В., Гожик А.П., Онищук В.І., Онищук І.І., (2008). Петроелектричні дослідження керну свердловини Чорноморського шельфу. Вісник Київського університету. Геологія, 44, 4-8.
2. Vyzhva S., Reva N., Gozhyk A., Onyshchuk V., Onyshchuk I., (2008). Petroelectrical investigations of borehole core of Black Sea shelf [Petroelektrychni doslidzhennya kernu sverdlovyny Chornomorskogo shelfu]. Visnyk Kyivskogo universytetu. Geologiya – Herald of Kyiv University. Geology, 44, 4-8 (In Ukrainian).
3. Вижва С.А., Рева М.В., Гожик А.П., Онищук В.І., Онищук І.І., (2010). Петроелектричні дослідження керну складнопобудованих порід-колекторів. Вісник Київського університету. Геологія, 50, 4-7.
4. Vyzhva S., Reva N., Gozhyk A., Onyshchuk V., Onyshchuk I., (2010). Petroelectrical investigations of borehole core of complexly-build reservoir rocks [Petroelektrychni doslidzhennya kernu skladnopolbudovanykh porid-kolektoriv]. Visnyk Kyivskogo universytetu. Geologiya – Herald of Kyiv University. Geology, 50, 4-7 (In Ukrainian).
5. Вижва С.А., Онищук Д.І., Онищук В.І., (2012). Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. Вісник Київського університету. Геологія, 57, 13-16.
6. Vyzhva S., Onyshchuk D., Onyshchuk V., (2012). Petroelectrical investigations of reservoir rocks of Western-Shebelynske gas condensate field [Petroelektrychna model porid-kolektoriv Zahidno-Shebelynskogo gazokondensatnogo rodovyscha]. Visnyk Kyivskogo universytetu. Geologiya – Herald of Kyiv University. Geology, 57, 13-16 (In Ukrainian).
7. Дахнов В.Н., (1975). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. Недра, 343.
8. Dahnov V., (1975). Geophysical methods of assesment of reservoir characteristics and hydrocarbon saturation of rocks [Geofizicheskie metody opredeleniya kollektorskih svoystv i neftegazonasyshcheniya porod]. Nedra – Subsurface, 343 (In Russian).
9. Дортман Н.Б., (1992). Петрофизика. Справочник. ч.1. Недра, 391.
10. Dortman N., (1992). Petrophysics. Handbook. part 1 [Petrofizika. Spravochnik ch.1]. Nedra – Subsurface, 391 (In Russian).
11. Дортман Н.Б., (1992). Петрофизика. Справочник. ч.2. Недра, 304.
12. Dortman N., (1992). Petrophysics. Handbook. part 2 [Petrofizika. Spravochnik ch.2]. Nedra – Subsurface, 304 (In Russian).
13. Дортман Н.Б., (1984). Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. Недра, 455.
14. Dortman N., (1984). Physical properties of rocks and mineral deposits. Geophysics Handbook [Fizicheskie svoystva gornikh porod i poleznykh iskopaemykh. Spravochnik geofizika]. Nedra – Subsurface, 455 (In Russian).
15. Пархоменко Э.И., (1965). Электрические свойства горных пород. Наука, 164.
16. Parkhomenko E., (1965). Electrical properties of rocks [Elektricheskie svoystva gornykh porod]. Nauka – Science, 164 (In Russian).
17. Fatt J. Effect of overburden and reservoir pressure on electric logging formation factor. – Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists, 41, 11.

Надійшла до редколегії 10.06.14

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof., E-mail: vsa@univ.kiev.ua  
 D. Onyshchuk, Postgraduate Student, E-mail: boenerges@ukr.net  
 N. Reva, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assos. Prof., E-mail: mvreva@gmail.com  
 V. Onyshchuk, Cand. Sci. (Geol.), Assistant, E-mail: vitus16@ukr.net  
 Geological Faculty, Taras Shevchenko National University of Kyiv  
 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine

## INTEGRATED PETROELECTRICAL MODELS OF DEVONIAN LIMESTONES AND CAMBRIAN SANDSTONES FROM DOBROTVIRSKA AREA OF VOLYNO-PODILIA

*This paper deals with the technique and results of research into petroelectrical properties of complex terrigenous and carbonate reservoirs. Analyzed are electric data and their relation to capacity properties of Devonian limestones and Cambrian sandstones from Dobrotvirsk area of Volyno-Podilia. The objective of the research was to build petroelectrical models of reservoir rocks based on the electrical parameters and their relation to capacity properties. Data on specific resistivity of reservoir rocks were used for specifying the range of its variation for different types and groups of rocks. These data were also essential for identifying the stratigraphic horizons, cross-sections and facies, as well as finding the relationship between specific resistivity and a range of factors such as mineral composition, pore structure, substance phase ratio, electric field intensity and frequency, and resistivity variations with epigenetic transformation and metamorphic changes in rocks. Laboratory data on electrical resistivity of rocks made it possible to interpret the results of employing electrometric well logging methods and electric exploration. Petrophysical laboratory data enabled us to determine the following properties: rock density (dry and saturated with synthetic brine), effective porosity (nitrogen and synthetic brine saturation methods), residual water saturation factor (by centrifugation), permeability (nitrogen stationary filtration method), interval time (P-wave velocity) and resistivity. There were obtained laboratory data on specific resistivity of rock samples (dry, partly and fully saturated with synthetic brine) in atmospheric and in simulated in-situ conditions. We estimated the petroelectrical parameters of Cambrian sandstones and Devonian limestones from Dobrotvirsk area to find an empirical correlation between petroelectrical parameters, porosity and permeability of the studied rocks. The correlations are mainly approximated by power function and serve as the basis for geological interpretation of geophysical data. Electrometric methods have proved to be a powerful tool in both laboratory and field rock studies, being efficient enough to provide extensive information on rock properties.*

**Key words:** porosity & permeability parameters, electrical parameters, pore volume, correlation dependencies, sandstone, limestone, porosity, resistivity, pressure, permeability, petroelectrical parameters.

С. Выжва, д-р геол. наук, проф., vsa@univ.kiev.ua  
 Д. Онищук, асп., boeerges@ukr.net  
 М. Рева, канд. физ.-мат. наук, доц., mvreva@gmail.com  
 В. Онищук, канд. геол. наук, ассист., vitus16@ukr.net  
 Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
 Геологический факультет, ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

## КОМПЛЕКСНЫЕ ПЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗВЕСТНЯКОВ ДЕВОНА И ПЕСЧАНИКОВ КЕМБРИЯ ДОБРОТВИРСКОЙ ПЛОЩАДИ ВОЛЫНО-ПОДОЛЬЯ

Рассматриваются особенности методики и результаты петроэлектрических исследований при изучении сложнопостроенных карбонатных и терригенных коллекторов. Приведены результаты определения электрических параметров и их связь с емкостными свойствами известняков девона и песчаников кембрия Добротвирской площади Волыно-Подолья. Целью проведенных исследований была разработка и создание петроэлектрических моделей пород-коллекторов, как основы комплексного анализа их электрических параметров и связей с емкостно-фильтрационными свойствами. Сведения об удельном электрическом сопротивлении пород-коллекторов используются для уточнения пределов его изменения для отдельных типов и групп пород; выделения отдельных стратиграфических горизонтов, разрезов и фаций; установления характера его зависимости от минерального состава, структуры порового пространства, соотношения фаз вещества, частоты и напряженности электрического поля; выявления характера изменения электрического сопротивления при эпигенетическом превращении и метаморфических изменениях горных пород. Материалы лабораторных исследований удельного электрического сопротивления пород используются при интерпретации результатов электрометрических методов исследований скважин и полевой электроразведки. Комплекс петрофизических лабораторных исследований включал определение: плотности исследованных пород (сухих и насыщенных моделью пластовой воды); открытой пористости (методами насыщения азотом и моделью пластовой воды); коэффициента остаточного водонасыщения (методом центрифугирования); проницаемости (методом стационарной фильтрации азота); интервального времени (скорости продольных упругих волн) и удельного электрического сопротивления. В процессе лабораторных работ определялось удельное электрическое сопротивление образцов пород при разных условиях (сухие, частично и полностью насыщенные раствором-имитатором пластового флюида) в атмосферных условиях, а также в условиях приближенных к пластовым. В результате выполненных лабораторных исследований изучены петроэлектрические параметры песчаников кембрия и известняков девона Добротвирской площади, установлены эмпирические корреляционные зависимости между петроэлектрическими параметрами и емкостно-фильтрационными свойствами исследованных пород, которые служат основой геологической интерпретации геофизических данных. Эти зависимости аппроксимируются в большинстве случаев степенной функцией. Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что электрометрические методы являются мощным средством как лабораторных, так и полевых исследований, достаточно эффективны и предоставляют широкую и ценную информацию о свойствах пород.

Ключевые слова: исследование керна, фильтрационно-емкостные параметры, электрические параметры, поровое пространство, корреляционные зависимости, песчаник, известняк, пористость, удельное электрическое сопротивление, давление, проницаемость, петроэлектрические параметры.

УДК 550.344

Е. Козловський, пров. інж.,  
 Д. Малицький, д-р фіз.-мат. наук, проф.,  
 E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua,

А. Павлова, асп. проф.,  
 Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна  
 Національної Академії Наук України,  
 вул. Наукова, 3-б, м. Львів, Україна, 79060

## РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ АЗИМУТАЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ $Q$ , ТА УТОЧНЕННЯ ШВИДКІСНОЇ МОДЕЛІ ЗАКАРПАТСЬКОГО СЕЙСМОАКТИВНОГО РЕГІОНУ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Виживою)

Метою представленої роботи є уточнення швидкісної моделі Закарпатського сейсмоактивного регіону для подальшого її використання у нейронно-мережевому моделюванні для розв'язання задачі розрахунку та уточнення глибини залягання джерел місцевих землетрусів. Проведено аналіз поведінки поширення сейсмічних хвиль в різних напрямках Закарпатського сейсмоактивного регіону. Обґрунтовано введення азимутального коефіцієнта  $q_i$  для застосування у навчачій вибірці нейронної мережі, як параметру, що відповідає за напрямок поширення хвилі в реальному середовищі. Показано два способи виділення секторів коли за основу взято або сейсмостанцію, або область сейсмічних подій. Обчислені середні значення азимутального коефіцієнта  $q_i$  для відповідних секторів із близькими значеннями  $q_i$  для одно-, дво- та три-шароватого середовища у відповідності до глибини розташування вогнища землетрусу в першому, другому або в третьому шарі. Оскільки три-шарувате середовище охоплює глибини знаходження джерел землетрусів до 8000–9000 м, то проведені розрахунки повністю відображають місцеві сейсмічні події Карпатського регіону. Розрахунок середніх потужностей шарів  $h$  та середніх швидкостей шарів  $v$  обчислювались окремо для кожної пари E-S (епіцентр-сейсмостанція). Для розрахунку азимутального коефіцієнта  $q_i$  третього шару використано метод умовного об'єднання шарів. Представлено розрахунки, які виконані для прямої P-хвилі (аналогічні розрахунки можна зробити і для S-хвилі). Обчислена відносна похибка розрахунку середнього значення азимутального коефіцієнта  $q_i$  для кожного сектору, який проведено на основі 4–26 подій для відповідних секторів в залежності від наявної кількості даних про події, які вибрано із сейсмологічних бюлетенів. Проведено інтерпретацію отриманих результатів та розглянуто варіанти використання даної методики. На прикладах показано використання азимутального коефіцієнта  $q_i$  для аналізу параметрів середовища.

Ключові слова: Закарпатський сейсмоактивний регіон; азимутальний коефіцієнт  $q_i$ ; навчача вибірка нейронної мережі; середня швидкість поширення хвилі в шарі; глибина розташування джерела землетрусу; прямі P та S-хвилі; пари E-S (епіцентр-сейсмостанція); умовна швидкість проходження хвилею об'єднаних шарів.

**Вступ.** Метод визначення координат епіцентру та розрахунку глибини залягання джерела землетрусу, що зареєстрований 4-ма та більшою кількістю сейсмічних станцій, є відомим і не потребує опису. Але з різних технічних причин не завжди вдається зафіксувати землетрус необхідною кількістю сейсмічних станцій і, відповідно, розрахувати глибину залягання джерела сейсмічної події. Проте, таку можливість може надати застосування іншого підходу, а саме, використання статистичного аналізу для розрахунку глибини залягання джерела землетрусу.

Представлена робота є лише першим кроком розв'язання задачі розрахунку та уточнення глибини залягання джерел місцевих землетрусів Закарпатського сейсмоактивного регіону. У даній статті показані результати розрахунків для одно-, дво- та три-шарового середовища (глибина до 8000–9000 м), для яких відомі глибини залягання вогнищ землетрусів, що повністю охоплюють місцеві сейсмічні події Карпатського регіону.

Одним з інструментів статистичного аналізу є мережі штучних нейронів. Для того, щоб отримати якісний