

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОЛІМІКТОВОГО СКЛАДУ МАТРИЦІ ПОРОДИ НА ЇЇ ПИТОМИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР

<sup>1</sup> С.Д. Федоришин, <sup>2</sup> С.А. Вижва

<sup>1</sup> ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42056  
e-mail: geophys@iung.edu.ua

<sup>2</sup> Київський національний університет ім. Т. Шевченка, 03022, м. Київ, вул. Васильківська, 90,  
тел. (044) 2597032, e-mail: vsa@univ.ua

*Разработана методика разделения терригенных пород-коллекторов на полимиктовые и мономиктовые за петрофизическими данными и данными скважинной электротометрии.*

*The methodics for differentiation of rocks-reservoirs on monomictic and polymictic ones using petrophysical and electrical logging data is developed.*

Зниження ефективності геолого-геофізичних досліджень у пошукових свердловинах обумовлено як суб'єктивними, так і об'єктивними факторами. До суб'єктивних факторів можна віднести технологічні, методичні прийоми проведення геофізичних досліджень свердловин (ГДС) та методологічні способи обробки геофізичних результатів. В цю групу можна віднести і недостатню класифікацію інженера-інтерпретатора.

До об'єктивних факторів слід віднести складну геологічну будову як самого розрізу пошукової свердловини, так і полімінеральний, багатозонний склад матриці породи-колектора. Окрім цього, слід віднести до об'єктивних факторів недостатню роздільну здатність та чутливість свердловинної геофізичної апаратури.

Наявність вище вказаних факторів призводить до пропуску продуктивних нафтогазонасичених порід, невідповідності прийнятих рішень при встановленні характеру насичення пошукових об'єктів.

Виходячи з цього, встановлення основних чинників, які формують електричні поля дослідження їх впливу на покази методів ГДС є актуальною і своєчасною задачею.

Аналіз та узагальнення результатів досліджень складнопобудованих порід-колекторів геофізичними методами показав, що поліміктіві пісковики у більшості випадків відображаються на аналогових геофізичних кривих неоднорознозначною до пластових умов характеристикою. У зв'язку з цим, нами досліджувався вплив поліміктового складу матриці породи на величину її питомого електричного опору та зміну подвійного різничного параметру ( $\Delta I_r$ ). Для цього ми скористалися моделлю глинистих пісковиків, яка описується у роботі [4].

Пропонується наступна формула залежності між питомою електропровідністю породи ( $\sigma_p$ ), питомою електропровідністю її провідних частинок ( $\sigma_{\text{част}}$ ) та параметром пористості  $P_p$ .

Раніше проведеними дослідженнями [2; 4] встановлено, що із збільшенням мінералізації електроліту, який насичує породу, відносний електричний опір порід  $P$  зростає. Але, як видно із результатів досліджень (рис. 1), на кривій

залежності  $P=f(C_b)$  виділяються дві ділянки відносно постійних значень  $P$  при зміні величини  $C_b$ . Перша ділянка, на нашу думку, спостерігається тоді, коли питомий електричний опір насичуючого флюїду зрівнюється із питомим електричним опором подвійного електричного шару на частинках мінеральних зерен, що складають породу. Це відповідає мінералізації  $\text{NaCl}$  0,1–0,5 Н (в середньому  $C_{b, \text{NaCl}}=0,3$  Н). Виходячи із цього, можна зробити висновок, що починаючи із граничного значення  $P_{п.гр.}=(C_b=0,4-0,5 \text{ Н})$  зміна концентрації  $\text{NaCl}$  не впливає на величину поверхневої провідності. У цьому випадку величина провідності подвійного електричного шару, утвореного на границі двох середовищ, та електропровідність вільного флюїду рівні. Друга ділянка, коли величина  $P$  не змінюється при зміні  $C_b$  спостерігається при досягненні мінералізації розчину близької до граничної, тобто 3–5 Н  $\text{NaCl}$ .

Аналізуючи отримані результати, автори пропонують використовувати ці явища для внесення поправок за так звану поверхневу електропровідність. Використання другої ділянки, для введення поправок у величину параметра пористості, за рахунок впливу поверхневої провідності пустотного простору породи, в даний час широко використовують при оцінці пористості за даними електричного каротажу. Підтвердження цього явища висвітлено у роботах [1; 4], де авторами для розрахунку питомого електричного опору нафтонасиченого пласта  $\rho_{nn}$  взято наступну формулу:

$$\rho_{nn} = P_p P_n P_n \rho_g, \quad (1)$$

де:  $P_p$  – параметр поверхневої електропровідності;

$P_n$  та  $P_n$  – відповідно, коефіцієнт збільшення електричного опору та коефіцієнт відносно го електричного опору (параметр пористості);

$\rho_g$  – питомий електричний опір пластової води.

Встановлені авторами Елланським М.М. [3] та Ахнаровим В.Х. [1] петрофізичні взаємозв'язки питомого електричного опору порід із різними фізичними чинниками, свідчать, що для флюїдів з концентрацією розчину солі  $\text{NaCl}$

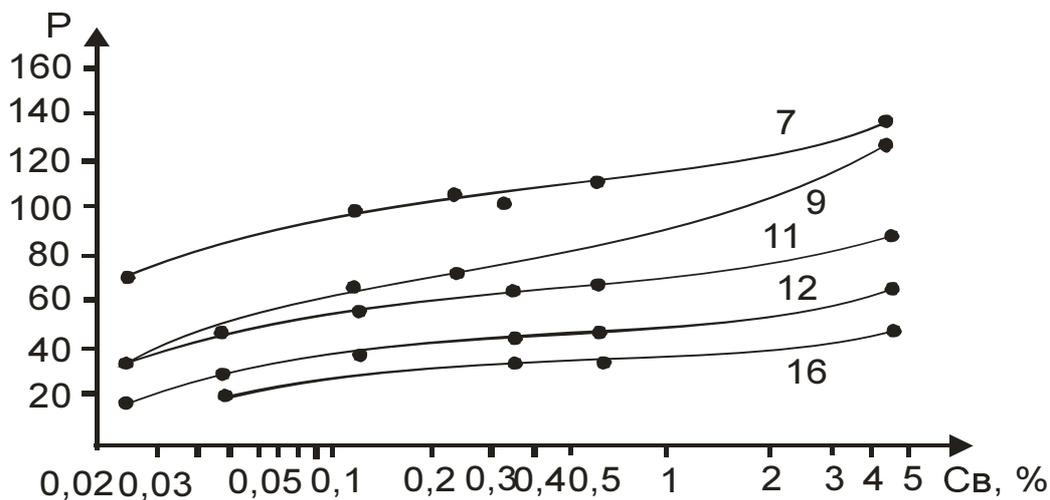


Рисунок 1 — Залежність параметра пористості  $P_n$  (шифр-кривих  $K_n$  порід-колекторів) від мінералізації насичуючих електролітів  $C_b$

менше 35%, електропровідність продуктивних пластів, в основному, визначається дисперсністю глинистих частинок та величиною залишкового водонасичення.

З метою визначення граничних значень концентрації води ( $C_b$ ) для продуктивних порід-колекторів, у яких поверхнева провідність рівна одиниці ( $\Pi=1$ ), проводились дослідження зміни питомого електричного опору зразків керну міоценових відкладів газоконденсатних родовищ Карпатської нафтогазоносною провінції, при ефективному тиску  $P_{эф}=0,1$  МПа та температурі  $t=18^{\circ}\text{C}$  [5]. У процесі експерименту зразки керну послідовно насичувались розчинами NaCl різної мінералізації, а саме: 0,024 Н; 0,046 Н; 0,111 Н; 0,217 Н; 0,325 Н; 0,581 Н; 4,27 Н. За даними експерименту побудовано залежності відносного опору  $P_n$  порід-колекторів від мінералізації насичуючого їх флюїду  $C_b$  (рис. 1). Із графіків залежностей, які усереднені для зразків керну, відібраного із порід з близькими за значеннями параметрами, що характеризують колекторські властивості ( $K_n$ ,  $K_{пр}$ ,  $P_n$ ,  $K_{зв}$ ), видно, що із збільшенням  $C_b$  значення  $P_n$  збільшуються і при мінералізації, вищій 35%,  $P_n$  практично не змінюється ( $P_n=\text{const}$ ).

У цьому випадку величина  $P_n$ , на нашу думку, обумовлюється не тільки сукупністю відкритих пор, але і кількістю електропровідних глинистих частинок в об'ємі порового середовища та матриці породи. Величина поверхневої провідності за даними експериментальних досліджень зразків керну колекції розраховувалась за формулою

$$\Pi = \frac{P_n}{P_{n\text{гран}}}, \quad (2)$$

де  $P_n$  і  $P_{n\text{гран}}$  — відповідно відносні опори породи при початковій та граничній концентрації електроліту (початкова  $C_b=0,24$ ;  $\rho_e=0,45$  Ом\*м при  $t=18^{\circ}\text{C}$ ).

На рис. 2 зображено графік зв'язку  $\Pi=f(\rho_e)$ , який ілюструє межі зміни параметру

поверхневої провідності від опору насичуючого флюїду.

Як видно із результатів досліджень при концентрації флюїду  $C_b < 0,1$  Н (7,9% NaCl) опір породи зростає  $\rho_n > 1$  Ом. Електропровідність породи у цьому випадку сформовано електропровідністю вільного флюїду ( $\sigma_{в.ф}$ ) та поверхневою електропровідністю глинистих і уламкових частин ( $\sigma_{г.л.ч}$ ). В той же час зазначено, що при високих концентраціях солі NaCl у воді ( $\rho_n \leq 0,3$  Ом\*м) електропровідність в основному залежить від провідності насичуючого флюїду. Граничне значення  $P_n$  для такого випадку відповідає концентрації:  $C_b = (0,4-0,5)$  Н ( $\rho_e \approx 0,04$  Ом\*м), що значно знижує питомий електричний опір продуктивних порід (рис. 2).

Враховуючи те, що питома електропровідність гірської породи є комплексною величиною і частка електропровідності глинистих та уламкових частин в електропровідності самої породи посідає значне місце, нами застосовано наступний підхід. Якщо припустити, що матриця породи складається тільки із твердих непровідних частинок і флюїду (мономіктові, гравійно-кварцеві пісковики), то у цьому випадку параметр пористості  $P_n$ , який розраховується за результатами електрометрії геологічних розрізів пошукових свердловин, відображає істинну зміну коефіцієнта пористості ( $K_n$ ). Однак, у пісковиках із поліміктовим складом матриці, окрім уламків кварцу, присутні також уламки польових шпатів, зерна яких у результаті пелітизації і каолінізації перетворюються у каолінит та інші глинисті мінерали. Слід зазначити, що до складу матриці поліміктових пісковиків входить розсіяна і структурна глинистість, яка суттєво впливає на величину фізично зв'язаної води та обумовлює величину адсорбційно-дифузійного потенціалу. Цемент поліміктових пісковиків в основному глинистий, карбонатний із залізистими включеннями. Такі особливості будови матриці поліміктових піс-

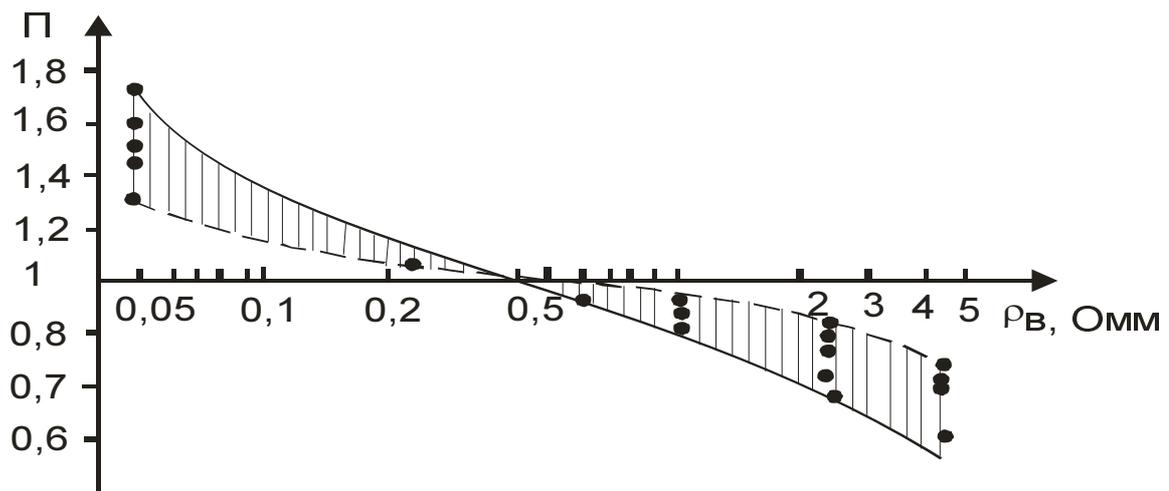


Рисунок 2 — Зв'язок параметра поверхневої провідності  $\Pi$  із питомим електричним опором флюїду  $\rho_v$ , який насичує породу-колектор

ковиків значно впливають на їх електричну провідність.

Спрощена схема формування питомої електропровідності поліміктових пісковиків нами розглядається як петрофізична модель, що складена із трьох електричних блоків, які її обумовлюють, а саме:

- блок послідовно з'єднаних ділянок пустот, заповнених флюїдом та уламками струмопровідних частинок;

- блок ділянок, виповнених дотичними між собою електропровідними частинками;

- блок, що обумовлює об'єм породи, у якому знаходяться у розсіяному стані струмопровідні мінерали класу сульфідів, алюмосилікатів та окислів.

Для такої петрофізичної моделі нами встановлено, що збільшення глинистості у породі з поліміктовим складом матриці призводить до зменшення її питомого електричного опору. Вплив глинистості на величину розрахованого за даними електрометрії  $P_n$  зумовлено тим, що у порових каналах, які пронизують глинистий матеріал, їх питомий електричний опір ( $\rho_{кан}$ ) не є рівним опору флюїду ( $\rho_f$ ), що насичує канал, а є функцією питомого опору подвійного електричного шару ( $\rho_{ш}$ ) поверхні твердої фази та відносного вмісту цього шару у об'ємі порового каналу.

$$\rho_{кан} = \frac{\rho_f \cdot \rho_{ш}}{\rho_f + (1 - \xi)\rho_{ш}}, \quad (3)$$

де:  $\xi$  – дзета потенціал подвійного шару поверхні твердої фази;

$(1 - \xi)$  – частка об'єму породи, зайнятого подвійним шаром поверхні твердої фази із певним  $\xi$  потенціалом.

В той же час для пісковиків, у яких має місце розсіювання в об'ємі породи однорідної

глинистої маси (пелітова фракція), питомий електричний опір розраховується за формулою

$$\rho_{нгл} = \rho_{кан} \cdot P_n^{2l}, \quad (4)$$

де  $P_n^{2l}$  – дійсний параметр пористості, для пісковиків гранулярної пористості, у яких домінує розсіяна глинистість.

Відмінність цього параметра пористості від розрахованого за даними електрометрії, отриманого при дослідженні водонасичених пластів з питомим опором  $\rho_f$ , характеризується величиною параметра поверхневої провідності:

$$\Pi = \frac{P_{нф}}{P_n^{гран}}, \quad (5)$$

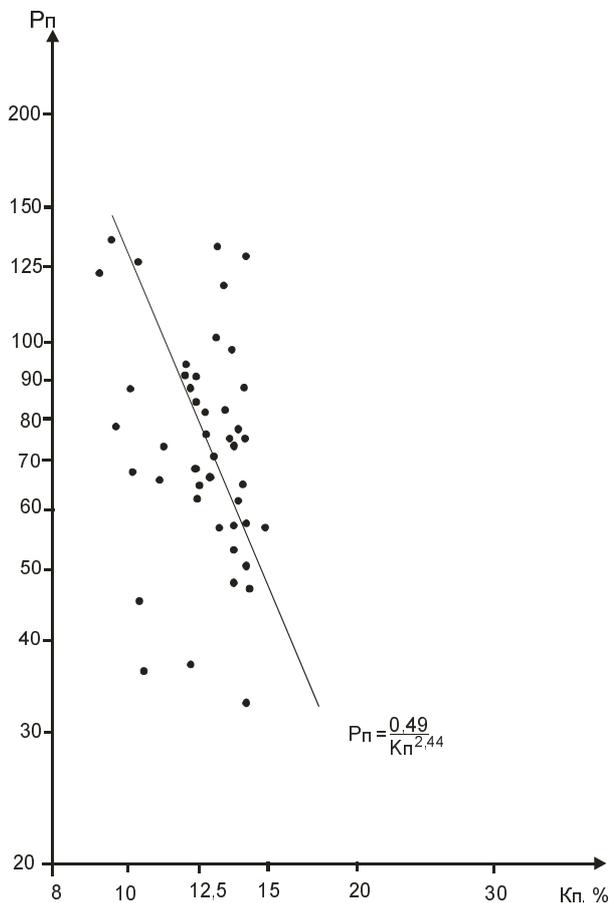
де:  $P_{нф}$  – фіктивний параметр пористості (виміряний у породі, насиченій водою),  $P_n^{гран}$  – максимальне значення параметра пористості у пласті для даної породи, яке відповідає відношенню питомих електричних опорів породи, насиченої водою з питомим електричним опором  $\rho_f$ , до електричного опору води граничної мінералізації. Величину  $P_{нф}$  вираховують, ви-

ходячи з того, що  $\rho_v = \rho_f$  та  $P_{нф} = \frac{\rho_{нгл}}{\rho_f}$ . Враховуючи формулу (4) отримаємо:

$$P_{нф} = P_{нгл} \frac{\rho_{кан}}{\rho_f}. \quad (6)$$

Значення параметра  $P_n$  зменшується з ростом  $\rho_f$ , оскільки зі зменшенням мінералізації насичуючого флюїду величина  $\rho_f$  зростає більш інтенсивно у порівнянні із  $\rho_{кан}$ . У такому випадку величина параметра поверхневої провідності менше одиниці. Для чистих незаглинизованих пісковиків, як раніше показано,  $\Pi = 1$ .

З метою встановлення впливу матриці поліміктових пісковиків на величину  $P_n$  нами проводились експериментальні дослідження кернавого матеріалу, відібраного із продуктивних візейських відкладів на Розпашнівському нафтогазовому родовищі. За даними лабораторних досліджень кернавого матеріалу в умовах, наближених до пластових, нами побудовано залежність  $P_n=f(K_n)$  (рис. 3).



**Рисунок 3 — Залежність параметра пористості від коефіцієнта пористості порід-колекторів візейських відкладів свердловин Розпашнівського родовища**

Як видно із графіка  $P_n=f(K_n)$  в області лінії регресії виділяється ряд точок, які суттєво відхиляються від неї. Область точок, яка знаходиться внизу від лінії регресії, характеризується заниженими параметрами пористості відповідно до їх фільтраційно-ємнісних властивостей, зокрема коефіцієнта пористості. Петрографічний опис шліфів дозволив встановити у матриці породи, відібраної із візейських відкладів пошукових свердловин Розпашнівського родовища, значний вміст (>5%) польових шпатів, слюд, каолініту. Цемент, в основному, кварцево-глинистий, пронизаний струмопровідними частинками, утвореними в процесі пелітизації польових шпатів. Сам цемент породи не вносить суттєвого вкладу у зменшення параметра пористості. Величину  $P_n$  визначають в основному пелітизовані польові шпати та слюди

частинки, які залягають у напрямку струмопровідних ліній, що пронизуюють кварцевоглинистий цемент. У шліфах також спостерігається мікросхараватість. На величину відкритої пористості зазначені фактори не впливають, в той час вони значно збільшують питому електропровідність ( $\sigma_n$ ) поліміктових пісковиків.

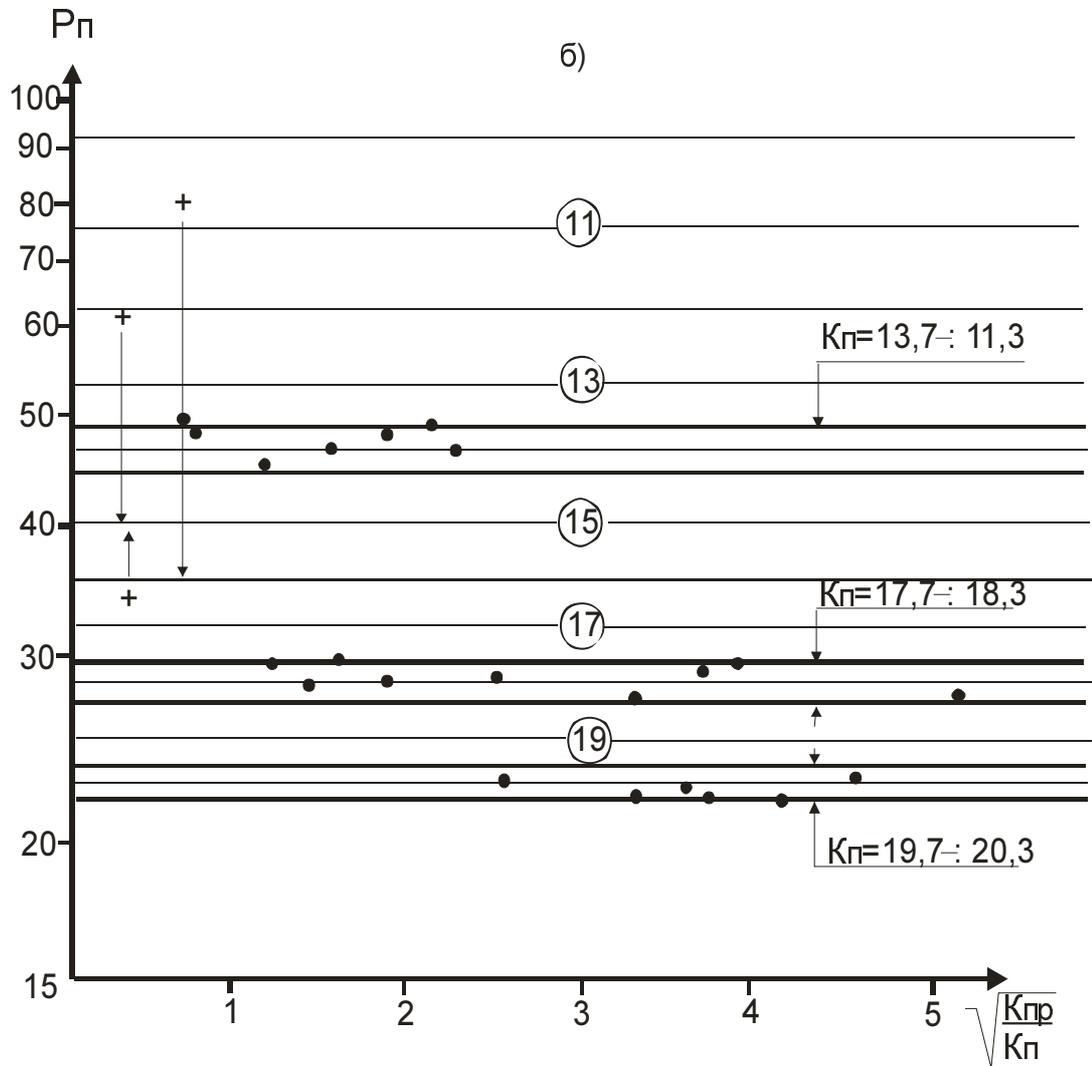
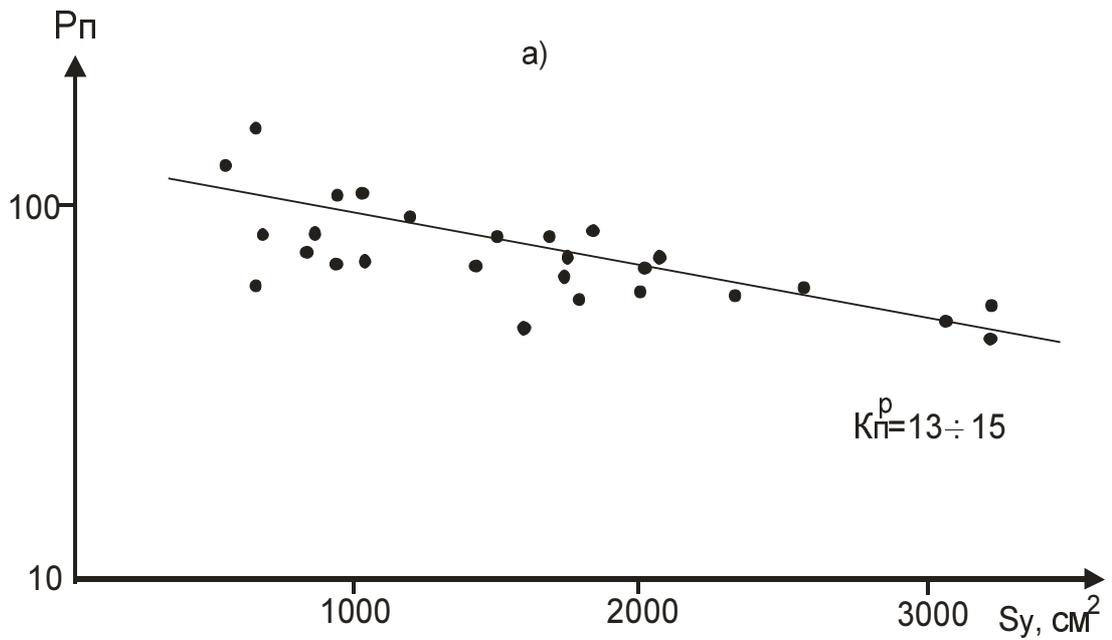
Область точок, яка знаходиться вище лінії регресії, характеризує породи однакової пористості (13-15%), але різної величини питомого електричного опору. Для цієї групи точок було розраховано питому поверхню ( $S_n$ ) порового простору порід-колекторів і побудовано залежність  $P_n=f(S_n)$  (рис. 4, а).

Із графіка видно, що параметр пористості знижується із збільшенням питомої поверхні зразків порід однакової пористості ( $K_n=const$ ), що не зовсім відповідає фізичному змісту. Однак про аналогічне явище вказано у роботах Поспелова В.В. для пісковиків з поліміктовим складом матриці і висвітлено у роботі Пархоменка Е.І. [5].

На наш погляд, підвищення величини параметра пористості  $P_n$  поліміктових пісковиків пов'язано із наступним. Як видно із аналізу шліфів, зерна польового шпату характеризуються підвищеною мікротріщинуватістю, значною проникністю і невеликою питомою поверхнею. Контакт зерен польових шпатів із насиченим породою флюїдом незначний. Слід зазначити також, що колекцію зразків керна, яку досліджувалося, відібрано із невеликого інтервалу свердловини Розпашнівська-16, що зумовлює стабільність мінерального складу матриці поліміктових пісковиків.

Аналіз та узагальнення впливу вище названих чинників на величину електропровідності породи дає можливість зробити наступні висновки. Найбільш суттєво підвищує електропровідність поліміктових пісковиків комплекс факторів, а саме: мікротріщиноватість; незначна питомою поверхня та високий вміст струмопровідних частинок і уламків різного класу мінералів. Значну роль при формуванні такого комплексу факторів відіграють пелітизація та вторинні перетворення в процесі осадо накопичення візейських відкладів.

Таким чином, вплив поліміктовості матриці породи на величину параметра пористості та електропровідності може бути враховано на основі експериментальних петрофізичних досліджень. Однак, геофізичні організації не завжди мають такі можливості, у зв'язку з чим нами розроблено і пропонується спосіб оцінки ступеня відхилення питомого електричного опору поліміктових пісковиків від зареєстрованого питомого електричного опору напроти мономіктових порід-колекторів з гранулярним типом пористості. В основу розробки способу взято дані електрометрії чистих неглинизованих пісковиків з гранулярною пористістю, у яких параметр пористості не залежить від структурних параметрів (радіуса пор та питомої поверхні).



11-13 – породи з  $K_{\Pi} = 13,7-11,3\%$ ; 17-19 – породи з  $K_{\Pi} = 17,7-20,3\%$

Рисунок 4 — Залежність параметра пористості від питомої поверхні  $S_{\Pi}$  (а) і еквіваленту радіуса пор порід-колекторів (б)

Для такого типу колектора нами побудовано залежність (рис. 4, б):

$$P_n = f\left(\sqrt{\frac{K_{np}}{K_n}}\right), \quad (7)$$

де:  $\sqrt{\frac{K_{np}}{K_n}}$  – еквівалент радіуса пор;

$K_{np}$  – коефіцієнт проникності порід-колекторів;

$K_n$  – коефіцієнт пористості.

Залежність побудовано за результатами петрофізичних досліджень чистих пісковиків з гранулярним типом пористості візейських відкладів Кулічівської площі. Зразки керну експериментальної колекції згруповано з певним інтервалом пористості.

Як видно із рисунку 4, в межах кожної групи зв'язок  $P_n$  і радіусом пор відсутній. Горизонтальні лінії відповідають параметру пористості чистих гранулярних пісковиків однакової пористості для конкретних інтервалів. Для того, щоб ідентифікувати приналежність породи до пісковиків поліміктового чи гранулярного типу, необхідно на графік (рис. 4б) нанести координати зразка, який досліджується (параметр пористості і радіус ефективних пор). Якщо нанесена точка попадає в межі однієї із визначених за результатами петрофізичних досліджень ліній пористості чистих гранулярних пісковиків, то породу-колектор представлено мономіктовим пісковиком. Якщо точка лежить на лінії пористості, що знаходиться за межами ліній пористості чистих гранулярних пісковиків, то порода відноситься до пісковиків поліміктового типу.

Величину відхилення значення зареєстрованого у свердловині  $P_n$  від величини  $P_n$  може бути оцінено відстанню між ординатами точки керну, який досліджувався та лінією пористості чистого гранулярного

Як приклад на рис. 4, б нанесено три координатні точки для зразків керну, що відповідають поліміктовому пісковіку візейських відкладів Розпашнівського родовища пісковика.

Узагальнюючи наведене вище, можна зробити висновок, що природа формування електропровідності порід-колекторів поліміктового типу є достатньо складна і залежить від багатьох фізичних та петрографічних чинників.

Виконані нами експериментальні дослідження дають змогу за результатами електрометрії у комплексі із петрофізичними параметрами визначеними на керні та у свердловині, ідентифікувати породи-колектори із неоднорідною пластивим умовам насичення електричною характеристикою, на поліміктові та мономіктові, що значно підвищує ефективність свердловинних геофізичних досліджень, сприяє підвищенню приросту та видобутку вуглеводнів.

### Література

1 Ахнаров В.Х. Закономерности изменения физических параметров полимиктовых пород-коллекторов по разрезу Западной Сибири // Труды ЗабсибНИГНИ, Вып. 89. – М.: Недра, 1969. – С.24-29.

2 Баграмян Е.А., Гаранин А.А., Никифорчин Б.Д. и др. Влияние минерализации насыщающего электролита на относительное сопротивление коллекторов палеогеновых отложений Предкарпатья // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. Вып.21. Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1984. – С.31-33.

3 Элланский М.М. Единая теоретическая модель проницаемости продуктивных отложений с межгранулярным типом пустот // Геофизика. – 2001. – № 6.

4 Кобранова В.Н. Петрофизика. – М.: Недра, 1986. – 392 с.

5 Пархоменко Э.И. Электрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. – М.: Наука, 1989. – 198 с.