

УДК 004.6; 550.8.05

Р.М.Камінський¹, Н.Б.Шаховська², Б.Т.Ладанівський³, Л.Г.Савків⁴¹Національний університет «Львівська політехніка», kaminsky.roman@gmail.com²Національний університет «Львівська політехніка», nataliya.b.shakhovska@lpnu.ua,³Карпатське відділення Інституту геофізики Національної академії наук України, bogys@cb-igph.lviv.ua⁴Карпатське відділення Інституту геофізики Національної академії наук України

ПОБУДОВА МОДЕЛІ ГЕОЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРІЗУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ФОРМАЛЬНОЇ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ МЕТОДУ ЗОНДУВАННЯ СТАНОВЛЕННЯМ ПОЛЯ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ

Стаття присвячена розробленню методу визначення характеристичних показників геоелектричних шарів та побудови за цими даними моделі георозрізу. Це дозволить швидко побудувати наближені моделі геоелектричного розрізу з використанням простої комп'ютерної техніки, що є особливо актуальне в умовах експериментальних польових робіт. Розроблений метод розрахунку параметрів приблизної моделі геоелектричного розрізу за табличними даними отриманих на етапі формальної інтерпретації кривої електричного опору. На основі запропонованого методу викладений алгоритм та створена програма розрахунку, описані вхідні та вихідні дані, форма представлення результату.

ПОЛЬОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ГЕОФІЗИЧНІ ДАНІ, ФОРМАЛЬНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ, ЕКСПРЕС-АНАЛІЗ, МЕТОД ЗОНДУВАННЯ СТАНОВЛЕННЯМ ПОЛЯ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ, МОДЕЛЬ ГЕОЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРІЗУ

Kaminsky R., Shakhovska N., Ladanivsky B., Savkiv L. Construction of the geoelectric cutting model by final interpretation of the data processing method for the position of the field in a neighborhood zone. The article is devoted to the development of a method for the determination of characteristic indices of geoelectric layers and the construction of these geocoding models based on these data. This will allow to quickly build approximate models of the geoelectric section using simple computer technology, which is especially relevant in the field of experimental field work. A method for calculating the parameters of an approximate model of a geoelectric section is developed based on tabular data obtained at the stage of the formal interpretation of the electric resistance curve. On the basis of the proposed method, the algorithm is presented and a calculation program is created, the input and output data are described, the form of presentation of the result.

FIELD STUDIES, GEOPHYSICAL DATA, FORMAL INTERPRETATION, EXPRESS ANALYSIS, METHOD OF PROCESSING FOR FIELD DEVELOPMENT IN A NEIGHBORHOOD ZONE, GEOELECTRIC CUTTING MODEL

Каминский Р., Шаховська Н., Ладанивский Б., Савкив Л. Построение модели геоэлектрических разрезов по результатам формальной интерпретации данных метода зондирования становления поля в ближней зоне. Статья посвящена разработке метода определения характеристических показателей геоэлектрических слоев и построения по этим данным модели георозризу. Это позволит быстро построить приближенные модели геоэлектрических разрезов с использованием простой компьютерной техники, особенно актуален в условиях экспериментальных полевых работ. Разработанный метод расчета параметров приближенной модели геоэлектрических разрезов по табличными данными полученных на этапе формальной интерпретации кривой электрического сопротивления. На основе предложенного метода выложенный алгоритм и создана программа расчетнойку, описаны входные и выходные данные, форма представления результата.

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ, В ФОРМАЛЬНОМ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ, ЭКСПРЕС-САНАЛИЗ, МЕТОД ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ, МОДЕЛЬ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЕЗАХ

Вступ

Для дослідження та вивчення фізичних процесів і явищ, що відбуваються у поверхневих шарах та надрах Землі, а також на її поверхні і в навколосферному просторі використовують різноманітні геофізичні методи та методики. Такі дослідження організуються у різний спосіб: це можуть бути систематичні наукові дослідження у формі безперервного моніторингу чи режимних геофізичних спостережень, або ж періодичні вивчення окремих регіонів чи площ. Кожен з таких напрямків дає

важливу первинну інформацію для подальшого вивчення цих процесів.

Безперервні геофізичні спостереження ведуться постійно в стаціонарних та тимчасових пунктах спостережень. На сьогоднішній час, збір та реєстрація фізичних полів відбувається переважно автоматично, шляхом створення і поповнення різноманітних баз даних. За даними регулярних та багаторічних спостережень можна оцінювати та аналізувати параметри полів та їх характеристики, вивчати динаміку змін з протягом тривалого

періоду часу, контролювати критично-важливі показники. Зазвичай подібні дослідження забезпечують міжнародні мережі, світові та національні центри, консорціуми, геологічні, екологічні та інші служби, об'єднання, агентства. Згадані організації, окрім інших типів даних, працюють з геомагнітними, сейсмічними, магнітотелуричними спостереженнями, формують відповідні архіви, подають візуальне представлення таких даних в режимі online і, крім того, надають спеціальний або безпосередній доступ до них

Польові геофізичні дослідження електромагнітними методами дозволяють вивчати локальні області або регіони. Такі роботи проводяться як вздовж профілю, так і на окремій площі для виявлення, дослідження чи прогнозування небезпечних геодинамічних явищ: зсуви, карстові процеси, руйнування гребель водо- та сховищ, тощо. Незалежно від характеру проведення спостережень, профільні це чи площинні, предметом досліджень є природні або штучні фізичні поля, а об'єктами досліджень виступають: елементи соціальної інфраструктури (школи, навчально-виховні комплекси, автодороги, майданчики будівництва), відпрацьовані шахти, дамби хвостосховищ, екологічно-проблемні території гірничо-промислових агломерацій.

Для приповерхневих вивчень верхньої частини геологічного розрізу використовують і метод зондування становленням електромагнітного поля у ближній зоні (ЗСБ, TDEM, TEM). Остаточні висновки щодо досліджуваної території формуються на основі розширеного аналізу, детальної обробки та інтерпретації польового матеріалу. Однак, для швидкої оцінки геодинамічної ситуації, особливо на поточній точці спостережень, важливим є експрес-аналіз первинних геофізичних даних.

1. Постановка проблеми

Результатом профільних чи площинних електророзвідувальних спостережень методом ЗСБ є реєстрація перехідних процесів [1, 2, 3, 4].

Отримані інформаційні сигнали трансформуються у параметри середовища – електропровідність, позірний електричний опір, глибина, значення яких у подальшому використовуються для побудови геоелектричних розрізів, що характеризують геологічну будову та структурні особливості досліджуваного регіону [5, 6, 7]. Очевидно, що такий аналіз потребує затрат часу і зусиль кваліфікованих спеціалістів, відповідної обчислювальної техніки. Проте доволі часто буває так, що необхідно швидко оцінити геодинамічну ситуацію за даними спостережень, тобто виникає потреба отримати спрощені геоелектричні розрізи. Насамперед це є актуальним в полі, коли необхідно оперативно проаналізувати зібрані дані на поточній точці профілю і на основі такого аналізу прийняти рішення про подальші вимірювання, а саме – для уточнення відстані до наступної точки спостережень чи зміну параметрів вимірювальної установки.

Залежно від геометрії досліджуваної території, вимірювання можуть проводитись або вздовж профілю, або охоплювати певну площу. Точки спостережень (підмети ПК) прокладають з однаковим розрахунковим кроком a , c (рис. 1), виміри відбуваються послідовно точка за точкою.

Якщо геодинамічна ситуація на сусідніх чи попередніх пікетах дослідження була незмінна, доцільним є відстань до наступної точки збільшити. Якщо ж параметри геологічного середовища (опір, глибина) вже помітно змінилися, або принаймні появилася така тенденція, крок подальших вимірів варто зменшити, причому, можливо, і доречним буде повернутися до попереднього пікету з меншим кроком для уточнення і деталізації геологічної ситуації на цій точці. Таким чином, змінюючи ще в процесі вимірів схему розташування пікетів від теоретичного регулярного до реального ситуативного, отримуємо можливість завжди мати максимально точні та правдиві дані вздовж профілю, а за окремих умов, коли петлі мають довжину 100 і більше метрів, такий підхід ще й суттєво зменшить

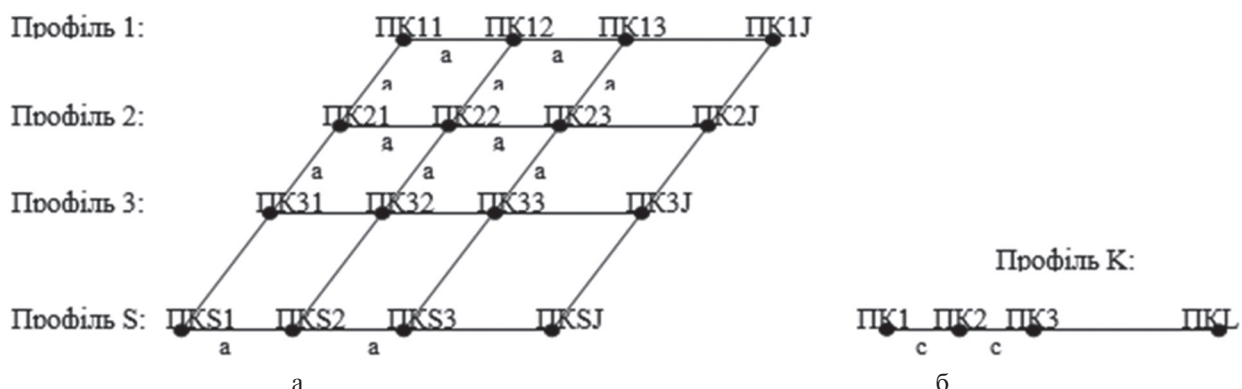


Рис. 1. Схема розташування пікетів при:

а – площинних та б – профільних дослідженнях; a , c – крок між точками спостережень

час проведення польових досліджень. Окрім цього, чим точнішими є результати польових вимірювань загалом, тим точнішою є обробка та інтерпретація даних, а разом з тим – і самі геоелектричні розрізи досліджуваної території. З огляду на це побудова приблизної моделі геоелектричного розрізу за даними ЗСБ має важливе науково-прикладне значення та є актуальною задачею.

Метою цієї статті є розробка методу визначення характеристичних показників геоелектричних шарів та побудови за цими даними моделі георозрізу.

2. Огляд літератури

Класична інтерпретація польових даних методу ЗСБ є складною і тривалою процедурою, яка включає поетапні, багатокрокові розрахунки і розв'язки прямих та обернених задач. Викладені у літературних джерелах методики описують процес обробки починаючи від ручної побудови на подвійних логарифмічних бланках кривих зондувань (із зареєстрованих імпульсів становлення поля), розрахунки узагальнених параметрів розрізу і підбір такої моделі геоелектричного розрізу, щоб теоретична та експериментальна криві збігалися якнайкраще, розробляються і свої методики трансформації інформаційних сигналів ЗСБ в параметри середовища [7, 4, 6, 5, 8, 9].

Характерним для згаданих робіт є те, що здебільшого в них описані основні формули для розрахунків, викладені загальні підходи щодо обробки та інтерпретації, проте у жодній не висвітлені питання швидкого експрес-аналізу польових даних з детальним покроковим алгоритмом практичної реалізації.

3. Матеріали та методи

Суть методу ЗСБ, застосування. Метод зондування шляхом становлення електромагнітного поля у ближній зоні джерела поля часто застосовується при розв'язанні задач структурно-пошукового, інженерно-геологічного та гідрогеологічного спрямування. Він дозволяє з достатньо високою роздільною здатністю визначати електричні параметри середовища та літологічний склад порід, виявляти структурні та тектонічні особливості геологічного середовища на відносно невеликих глибинах. Метод ЗСБ заснований на явищі електромагнітної індукції, належить до методів зі штучним (контрольованим) джерелом і полягає у вивченні поля перехідних процесів, що виникає в землі при зміні струму в джерелі [6, 4, 10]. За вимірними експериментальними значеннями з простих побудов кривих становлення можна аналізувати первинні геофізичні дані, проводити формальну інтерпретацію, суть котрої полягає у розрахунку залежності

поздовжньої сумарної провідності $S(h)$ та питомого електричного опору $\rho(h)$ від глибини [7, 9].

Побудова моделі геоелектричного розрізу. Точніші параметри геологічного середовища (опір, глибина, товщина, кількість шарів) можна отримати з моделі геоелектричного розрізу. Для побудови такої моделі беруться до уваги результати формальної інтерпретації, а саме – крива опору і як допоміжна – крива провідності.

Традиційною моделлю для методів зондування є модель горизонтально-шаруватого середовища, оскільки суттєво властивості геологічного середовища змінюються по вертикалі як в планетарному масштабі, так і при детальних дослідженнях. З урахуванням цього факту і будуються моделі. На рис. 2 і рис. 4 подані 2 варіанти побудови моделі: схематична і точна.

Схематична побудова моделі. Схематична побудова моделі геоелектричного розрізу є доволі простою та інтуїтивно зрозумілою і проводиться на основі візуальної оцінки кривих поздовжньої сумарної провідності $S(h)$ та питомого електричного опору $\rho(h)$, значення яких отримуємо на етапі формальної інтерпретації даних. Спрощене подання такої процедури представлено на рис. 2.

Точна побудова моделі. Схематично модель геоелектричного розрізу будується за даними формальної інтерпретації. З кривих поздовжньої сумарної провідності $S(h)$ та питомого електричного опору $\rho(h)$, що представлені на рис. 2, наочно можна бачити розподіл середовища на шари, а також – приблизні їхні товщини. Питомі опори шарів – це найбільші та найменші значення кривої $\rho(h)$, орієнтовні границі шарів – точки перегину цієї ж кривої. Хоча описана процедура і є достатньо очевидною, проте скористатися нею для автоматизованого розрахунку та експрес-аналізу даних практично неможливо. Лише знаючи аналітичний вираз функції, можна знайти згадані величини. Однак, на практиці, зазвичай, залежність одного параметра від іншого часто представляється набором експериментальних даних, при цьому аналітичний вигляд цієї залежності, як і результатів формальної інтерпретації, невідомий. У таких випадках мають справу з інформацією, що подається у вигляді таблиці, тобто маємо табличне представлення даних. З огляду на це, пропонується метод розрахунку параметрів приблизної моделі геоелектричного розрізу за табличними даними інтерпретації.

Метод розрахунку параметрів приблизної моделі геоелектричного розрізу за табличними даними. Суть методу полягає у тому, що характеристичні параметри геологічного середовища, тобто параметри

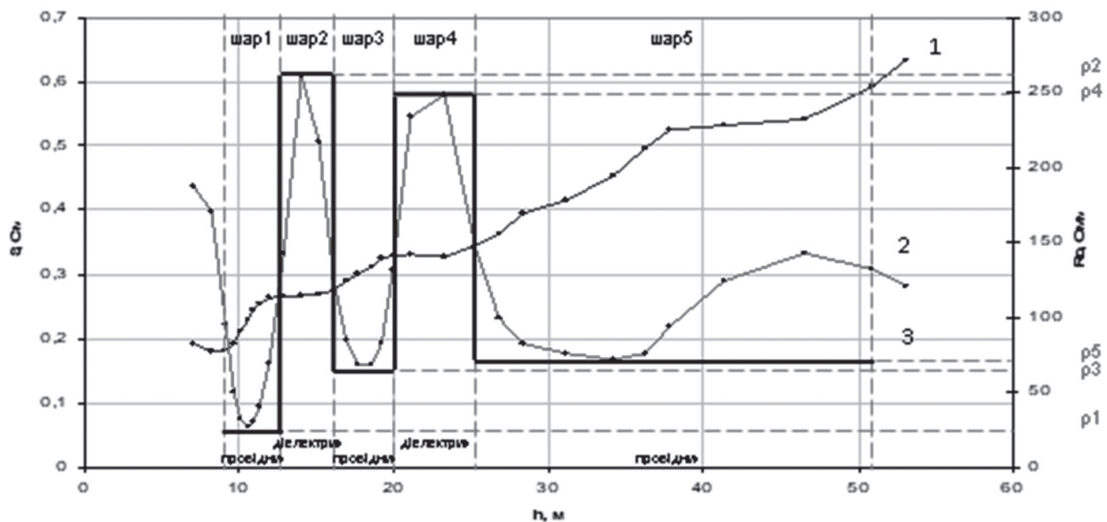


Рис. 2. Схематична побудова моделі

(1 – крива поздовжньої сумарної провідності $S(h)$, 2 – крива питомого електричного опору $\rho(h)$, 3 – модель геоелектричного розрізу)

моделі геоелектричного розрізу, розраховуються з отриманої на етапі формальної інтерпретації кривої електричного опору із застосуванням для знаходження потрібних масивів питомих опорів і відповідних їм глибин першої та другої похідної кривої $\rho(h)$. Результат формальної інтерпретації – це масиви значень опорів та глибин. Знайти похідні за даними у табличному представленні можна двома шляхами: перший – через пошук деякої приблизної функції, яка б замінила табличні значення. І другий – пошук похідних за сусідніми точками, що базується на фізичному змісті самої похідної, тобто те, що перша похідна – це швидкість, котра розраховується як відношення різниць ординат сусідніх точок до різниці їх абсцис: $\approx \Delta y / \Delta x$. Перший спосіб знаходження похідної для швидкої обробки чи експрес-аналізу не є цілком прийнятний. У другому варіанті для приблизного обчислення похідних передбачається використання чисельного диференціювання з допомогою методу кінцевих різниць. У цьому випадку похідні виступають як швидкості зміни функції, тобто визначаються відношенням приросту функції до приросту її аргументу і розраховуються через елементарні операції віднімання та ділення. Якщо функція задана масивами значень, а результатом формальної інтерпретації є саме такі набори даних (рис. 2), похідну у точці x_i можна знайти за формулою: $f'(x_i) = (y_{i+1} - y_i) / (x_{i+1} - x_i)$. Такий підхід для розрахунку похідних з використанням найпростіших математичних операцій для експрес-аналізу є повністю задовільний.

Для прикладу, за даними формальної інтерпретації розрахуємо першу та другу похідну кривої $\rho(h)$ (рис. 3).

На основі отриманих значень точну побудову моделі представимо на рис. 4.

D12		= (C12-C11)/(A12-A11)				F
	A	B	C	D	E	
1	h (м)	S (См)	Ro (Омм)	1похідна	2похідна	
2	7,08	0,19	187,14			
3	8,19	0,18	170,99	-14,43		
4	9,14	0,18	95,11	-80,40	-69,89	
5	9,64	0,19	49,81	-89,97	-19,02	
6	10,07	0,21	32,03	-41,96	113,29	
7	10,54	0,23	27,22	-10,12	67,07	
8	10,94	0,24	29,47	5,65	39,61	
9	11,34	0,25	40,62	27,51	53,94	
10	11,97	0,26	69,12	45,66	29,07	
11	12,92	0,27	142,53	77,48	33,60	
12	14,02	0,27	261,19	107,62	27,33	
13	15,13	0,27	217,14	-39,53	-132,03	
14	16,13	0,28	125,79	-91,29	-51,74	

Рис. 3. Розрахунок похідних кривої $\rho(h)$

Опис запропонованого методу:

1) розраховується крива питомого електричного опору $\rho(h)$, її перша та друга похідна (методом кінцевих різниць);

2) масиви значень Y та X для побудови моделі геоелектричного розрізу беруться з кривої $\rho(h)$ з урахуванням першої та другої похідних, а саме:

– значення Y – значення питомих опорів шарів ρ – береться з кривої $\rho(h)$ в точках її екстремумів (значення y);

– значення X – значення границь шарів h – береться з кривої $\rho(h)$ в точках її перегину (значення x), тобто в точках, де x міняє значення;

3) для пошуку похідних, рівних 0 (точки переходу через 0), достатньо скористатися лінійною інтерполяцією на основі двох сусідніх точок;

4) на етапі пошуку значень Y питомих опорів шарів пропонується для отримання максимально точного результату спершу криву $\rho(h)$ в інтервалах між дискретними розрахованими значеннями інтерполювати сплайнами.

Запропонований алгоритм цілком придатний для швидкої обробки чи експрес-аналізу експериментальних даних і складений таким чином, щоб його легко можна було запрограмувати,

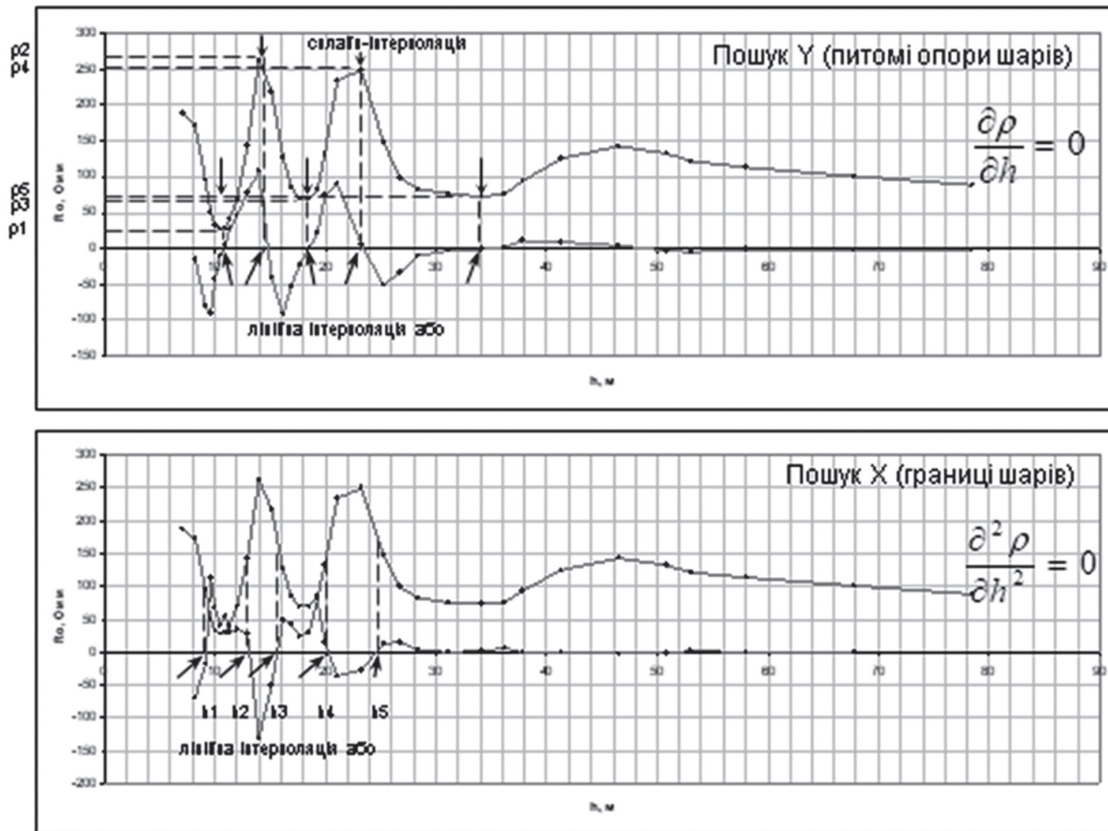


Рис. 4. Точна побудова моделі

використавши нескладні математичні операції та функції. До прикладу, у пакеті Octave, що є вільним програмним забезпеченням і поширюється під ліцензією GNU GPL, серед вбудованих функцій є чимало для одномірної інтерполяції з можливістю вибору потрібного методу [11]. Так, для лінійної інтерполяції можна скористатися функцією `interp1()` або розрахувати потрібне значення з рівняння прямої за двома точками самостійно, для сплайн-інтерполяції з урахуванням неперервності першої та другої похідної для найкращого результату варто обрати функцію `spline()`.

На основі викладеного методу у середовищі GNU Octave розроблена програма розрахунку параметрів геологічного середовища для побудови моделі геоелектричного розрізу (рис. 5).

Вхідними даними для цієї програми є результати формальної інтерпретації: масив глибин (h) та відповідний їм масив питомого електричного опору (R_0), що представляють собою криву залежності (h) (рис. 2). Саме ці величини використовуються для подальших розрахунків, знаходження першої і другої похідних, пошуку опорів шарів та глибин залягання. Вихідними даними є знайдені масиви електричного опору, приблизних меж шарів, а також – сформовані остаточні масиви значень для побудови приблизної моделі геосередовища. Результат роботи програми представлений на рис. 5б – це графік-модель геоелектричного розрізу,

збережений у форматі png. Засоби пакету GNU Octave підтримують роботу з багатьма іншими форматами зображень.

4. Обговорення

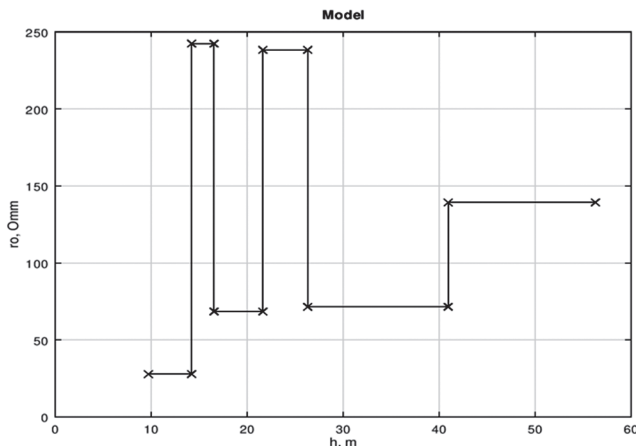
Зазначені особливості є важливими при вирішенні практичних задач чи роботі з даними експериментальних польових робіт, а визначення характеристичних показників геоелектричних шарів описаним методом та їх уточнення за рахунок зміни кроку спостережень чи параметрів вимірювальної установки надасть можливість для швидкої побудови моделі георозрізу.

Оскільки тривалість виконання польових робіт залежить і від оперативної оцінки геодинамічної ситуації безпосередньо на поточній точці спостережень, запропонований метод з використанням простих розрахунків, що не потребує потужного програмного забезпечення чи комп'ютерної техніки, легко і доволі ефективно можна буде використовувати для швидкої експрес-інтерпретації як у стаціонарних умовах, так і особливо в умовах польових робіт. Це дозволить оптимально спланувати подальші профільні чи площинні вимірювання, оперативно оцінити геодинамічну ситуацію, скоротити загальний час досліджень на тій чи іншій території, отримати точніші географічно первинні дані спостережень, а загалом – і достовірніші результати обробки та інтерпретації.

```

#!/usr/bin/octave
#
#####
fName = argv{1};
A = load (fName);
N = size(A,1);

# dRho/dh
for i = 2:N
    p1(i)=(A(i,5)-A(i-1,5))/(A(i,3)-A(i-1,3));
endfor #
N = size(p1,2);
j=0;
for i = 2:N-1
    if (sign(p1(i)) != sign(p1(i+1)))
        j=j+1;
        x(j)=(A(i+1,3)-A(i,3))*(-p1(i))/(p1(i+1)-
            p1(i))+A(i,3);
    endif
endfor
ro=spline(A(:,3),A(:,5),x);
# d2Rho/dh2
for i = 3:N
    p2(i)=(p1(i)-p1(i-1))/(A(i,3)-A(i-1,3));
endfor
    
```



а б
Рис. 5. Уривок програми розрахунку (а) та результат роботи (б) – модель геоелектричного розрізу за даними формальної інтерпретації

Висновки

За результатами проведеної роботи можна зроби-ти такі висновки:

- розроблений метод розрахунку параметрів приблизної моделі геоелектричного розрізу за табличними даними отриманих на етапі формальної інтерпретації кривої електричного опору;
- на основі запропонованого методу викладений алгоритм та створена програма розрахунку, описані вхідні та вихідні дані, форма представлення результату;
- середовищем розробки програмних реалізацій обраний безкоштовний спеціалізований математичний пакет з ліцензією GNU GPL – Octave.

Запропонований в роботі метод призначений для роботи з геофізичними даними методу зондування становленням електромагнітного поля в ближній зоні з вимірювальною установкою „петля в петлі”. Розрахунок параметрів моделі геоелектричного розрізу ведеться на основі кривої питомого електричного опору. Характерними особливостями методу є:

- можливість знаходження параметрів моделі за даними, представленими таблично;
- для забезпечення найкращого результату розрахунку пропонується використання відповідних методів інтерполяції в залежності від ситуації;
- застосування в ході обчислень простих формул, нескладних розрахунків та елементарних математичних операцій.

Список літератури:

[1] M.N. Nabighian and J.C. Macnae Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods, Chapter 6 in Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Volume 2, Application, Parts A and B. Edited by Misac N. Nabighian, Published January 1, 1991, <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch6> , pages 427-520.

[2] George V. Keller Principles of time-domain electromagnetic (TDEM) sounding. The Leading Edge. Vol.16.; Issue. 4.; Pages. 355-357 (Issue publication date: April 1997), <https://doi.org/10.1190/1.14337632>.

[3] L.L. Vanyan Electromagnetic Depth Soundings. Translated from Russian by George V. Keller. Consultants Bureau, New York, 1967, pages 312.

[4] Б.К. Матвеев Электроразведка: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990 – 368 с.

[5] Толстой М.І., Гожик А.П., Рева М.В., Степанюк В.П., Сухорада А.В. Основи геофізики (методи розвідувальної геофізики): Підручник. – К.: Видавничо-поліграфічний центр „Київський університет”, 2006. – 446 с.

[6] Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Под редакцией проф. В.К. Хмелевского, доц. И.Н. Модина, доц. А.Г. Яковлева – М.: 2005. – 311 с.

[7] Сидоров В.А., Тикшаев В.В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне – Саратов, 1969. – 68 с.

[8] Рева М.В. Трансформація інформативних сигналів становлення поля в ефективні геоелектричні параметри з використанням інтегральних часових характеристик перехідних процесів / М.В. Рева, Т.В. Руденко, Н.С. Єгорова, Л.П. Андрієвська // Збірник наукових праць „Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики”. – 2010. – Вип.. 7. – С. 110-129.

[9] Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка – М.: Недра, 1985. – 192 с.

[10] Савків Л.Г. Розробка структур файлів для оптимального відображення первинних електромагнітних даних геофізичних досліджень // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. Інформаційні системи та мережі. – 2018. – № 887. – С. 105–115.

[11] GNU Octave [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://octave.org/doc/v4.0.0/index.html> (дата звернення 17.11.2018) – Назва з екрана.

Надійшла до редколегії 03.10.2019