

УДК 621.317 (575.2) (04), 550.832.053

В.М. Курганський, д-р геол.-мінералог. наук,
І.В. Тішаєв, асп.

СПОСІБ ЗНЯТТЯ ВІДЛІКІВ ЗА ДІАГРАМАМИ ЕКРАНОВАНИХ МІКРОЗОНДІВ

Розглянуто можливість побудови алгоритму зняття відліків з діаграм, отриманих мікрометодами електричного каротажу, на основі дискретного вейвлет-перетворення.

In article rate a possibility to development readout algorithm from a focused microresistivity logs on basis of discrete wavelet transform.

Стан проблеми. Метод мікрозондів екранованого заземлення з автоматичним фокусуванням струму є складовою електричних методів дослідження свердловин [7]. У практиці каротажу найбільш широко використовуються кілька модифікацій, що відрізняються за кількістю електродів мікроустановок (двох-, трьох- та чотирьохелектродні). Метод, який базується на дослідженні геологічного розрізу такими мікрозондами, називається боковим мікрокаротажем (БМК). При цьому визначається ефективний питомий опір (далі – ефективний опір), що є прямо пропорційним питомому опору того невеликого об'єму геологічного середовища, який безпосередньо прилягає до електродів мікрозонду, оскільки на показання мікрозондів екранованого заземлення з автоматичним фокусуванням струму, вплив свердловини є значно меншим, ніж на показання звичайних мікрозондів. У методі БМК вимірюється різниця потенціалів між певними електродами (залежно від модифікації зондових установок), що є прямо пропорційною ефективному опору досліджуваного середовища. Поруч із цим можливий також інший варіант – вимірювання сили струму, який віддається центральним (екранованим) електродом у навколишнє геологічне середовище. Така модифікація має назву екранований токовий метод (ЕТМ). Тут зміна величини струму є обер-

нено пропорційною зміні ефективного опору середовища, або прямо пропорційною зміні ефективної провідності. У практиці геофізичних досліджень свердловин ЕТМ переважно використовується для дослідження вугільних і рудних свердловин, причому конструктивно зонди ЕТМ подібні до трьохелектродних зондів бокового каротажу (БК), проте, оскільки метод демонструє високу роздільну здатність геологічного розрізу і дає можливість точно визначити межі та потужності окремих шарів гірських порід, то останнім часом він знайшов застосування в пластовій нахилометрії. Причому в ролі зондувальної установки виступають двохелектродні мікроустановки БМК. Таку модифікацію методу буде доцільно назвати мікроекранований токовий метод (МЕТМ). На базі цього методу різними закордонними та вітчизняними фірмами були розроблені (із деякими незначними варіаціями) промислові варіанти пластових нахиломірів, які нині використовуються на виробництві. У цьому контексті можна відмітити шестиважільний нахиломір фірми Gearhart Industries, Inc. (USA), шестиважільний нахиломір НІД-1 фірми "Геоніт" (Росія), а також шестиважільний пластовий нахиломір НП-6, розроблений співробітниками кафедри теоретичної і прикладної механіки механіко-математичного факультету КНУ імені Тараса Шевченка

© В.М.Курганський, І.В.Тішаєв, 2005

спільно із фахівцями КБ "Геофізприлад" концерну "Надра" (Україна). Необхідно відзначити, що ці прилади використовуються тільки для визначення кутової орієнтації шарів гірських порід, а отже, не використовуються повною мірою їхні потенційні можливості.

Постановка задачі. За даними вимірів пластивим нахиломіром будуються, насамперед, структурні карти, визначаються елементи залягання шарів, визначається структурний нахил, відтворюється обстановка осадо-накопичення, вирішуються на якісному рівні окремі геологічні задачі тощо. Проте, оскільки прилади базуються на цілком конкретному геофізичному методі дослідження свердловин, то, вочевидь, має сенс проводити обробку та інтерпретацію записаних даних відповідно до існуючих та (або) розроблених під конкретний прилад методик із наступним виходом на кількісні параметри,

які дозволяють вже вирішувати задачі промислової геофізики. Прилад НП-6 реалізує метод МЕТМ, а отже, має незначну глибинність дослідження, але використання екранованих заземлень з автоматичним фокусуванням струму дозволяє реєструвати сигнал, прямо пропорційний ефективній провідності присвердловинної частини пласта [7], що дає потенційну можливість визначити при подальшій обробці [3; 5] питомий опір промитої частини шару-колектора ($\rho_{пл}$). Виходячи з цього, розглянемо на прикладі даних, записаних пластивим нахиломіром НП-6, окремі елементи методики попередньої обробки діаграм, а саме – очищення сигналу від завад і зняття відліків. На рис. 1 представлена частина запису в свердловині № 4 Гнединцівської площі. Діаграми центровані та нормовані: $\sigma_{ef} \rightarrow \hat{\sigma}_{ef}$.

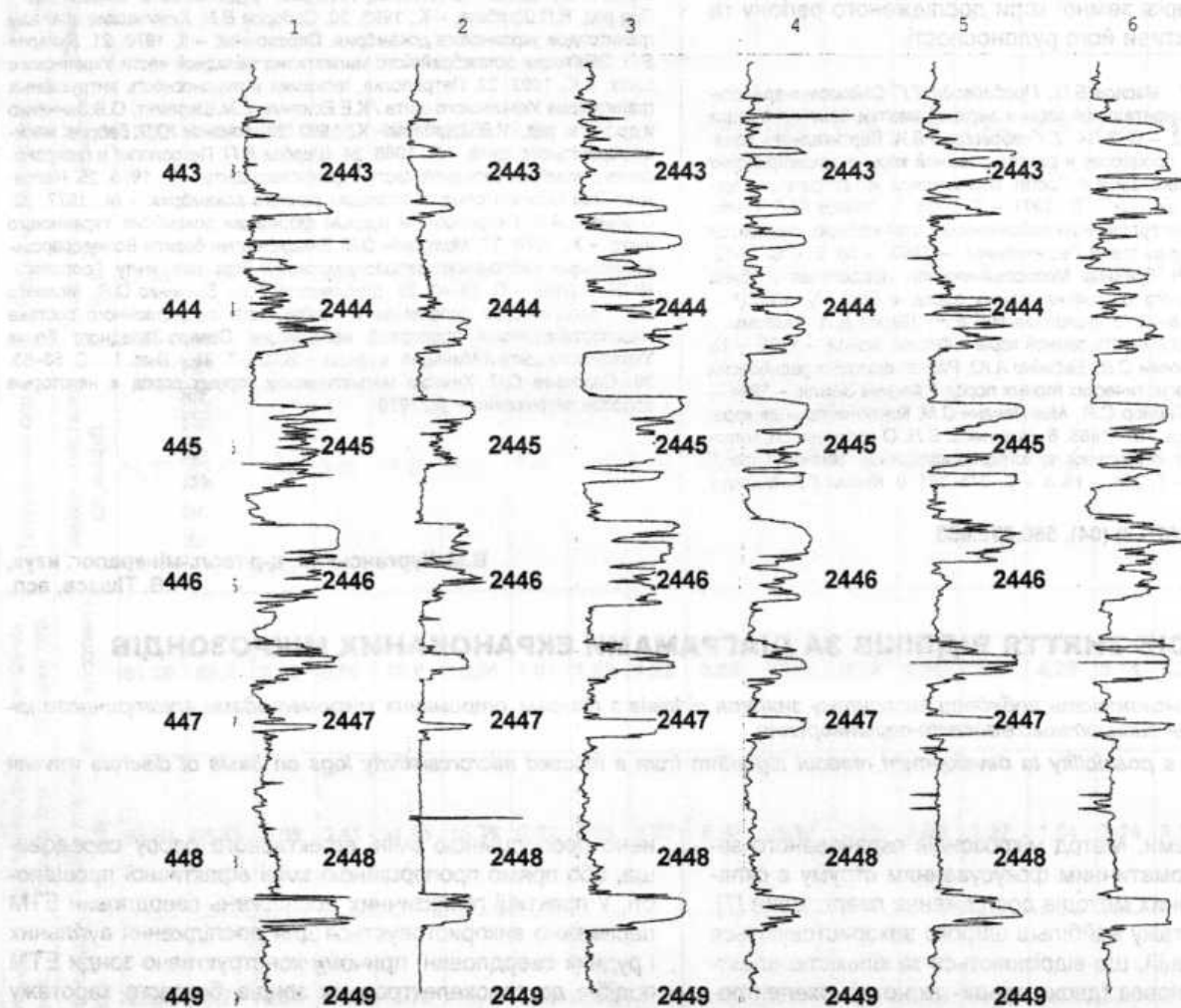


Рис. 1. Фрагмент запису шестиважільним шаровим нахиломіром НП-6 в свердловині №4 Гнединцівської площі. Наведені криві відображають зміну ефективної провідності гірських порід по шести окремих каналах. Дані центровані та нормовані

З рис. 1 добре простежується загальна кореляція кривих, записаних по окремих незалежних каналах, проте також добре видно, що сигнали ускладнені випадковими завадами, зіставними за амплітудою із самим сигналом. Така ситуація пояснюється нещільним приляганням мікроустановки до стінки свердловини, оскільки остання має шорсткувату поверхню, а башмак мікрозонда – плоский, і в процесі руху приладу товщина проміжку між площиною башмака мікрозонда та стінкою свердловини постійно змінюється, до того ж довільним чином для різних башмаків. Крім того, іншим джерелом завад можуть виступати тріщини буріння, які утворили-

ся в процесі розбурення гірських порід. У шарах із різними механічними властивостями, щільність таких тріщин буде різною, і будуть різними амплітуди та частота утворення хибних аномальних сигналів. Це значно ускладнює процес зняття відліків. Тому необхідно підібрати такі математичні підходи до обробки наведених даних, які б дозволили: а) відфільтрувати височастотні завади, зберігши при цьому особливості форми сигналу в часовій (просторовій) області; б) трансформувати сигнал відповідно до модельних уявлень про зміну вимірюваної величини в геологічному середовищі пев-

ного типу. Спробуємо послідовно, у визначеному вище порядку, обробити наведені на рис. 1 криві.

Результати досліджень. Більшість лінійних методів фільтрації, як, наприклад, метод рухомої смуги, медіанна фільтрація тощо, призводять до втрати характерних особливостей сигналу та до отримання помилкових результатів [6]. Цілком задовільні результати можна отримати за допомогою цифрового фільтра на основі дискретного перетворення Фур'є. Усе це давно використовується на практиці і є добре відомим, як є добре відомими і проблеми, пов'язані з тим чи іншим методом фільтрації. Останнім часом в галузі обробки інформації широкої популярності набув математичний апарат, який називається вейвлет-аналіз (від "wavelet" – коротка або компактна хвиля). Перетворення Фур'є представляє сигнал $f(t)$ у вигляді суми зважених синусоїдальних функцій різних частот $f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(i n t)$, де $w_n(t) = \exp(i n t)$, $n \in \mathbb{Z}$ є ортонормованим базисом функціонального простору $L^2(0, 2\pi)$, побудованим за допомогою масштабного перетворення єдиної функції $w(t) = \exp(i t)$. Натомість, вейвлет-перетворення представляє сигнал $f(t)$ у вигляді зваженої суми так званих вейвлет-функцій

різних масштабів $f(t) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} c_{jk} \psi_{jk}(t)$, де $\psi_{jk}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j k - t)$, $j, k \in \mathbb{I}$ – ортонормований базис функціонального простору $L^2(\mathbb{R})$ [1]. Вимоги, які ставляться до функцій $\psi(t)$, описані в літературі [1; 2; 8]. Параметр масштабу j є аналогом частоти у Фур'є-перетворенні, а параметр k задає зсув вейвлет-функції уздовж сигналу. Ефективним прийомом

для очищення сигналів від завад із одночасним збереженням структури сигналу є побудова так званих квадратурно-дзеркальних фільтрів [4; 8]. Сутність цього методу полягає в наступному. Вихідна числова послідовність (досліджуваний ряд даних, або сигнал) пропускається через фільтри низьких і високих частот, причому ваговою функцією фільтру високих частот виступає безпосередньо вейвлет-функція. Вагова функція фільтру низьких частот називається скейлінг-функцією (масштабуючою функцією). У дискретному випадку фільтри задаються переліком значень відповідних функцій у точках дискретизації досліджуваного сигналу, тобто своїми ваговими коефіцієнтами. Потім результат фільтрації низькочастотним фільтром знову пропускається через ті самі фільтри і т. д. У результаті отримуємо набір коефіцієнтів: результати фільтрації високочастотними фільтрами на різних рівнях плюс результат фільтрації низькочастотним фільтром на останньому рівні. Щоб очистити вихідний сигнал від завад, виконують занулення всіх коефіцієнтів, які мають абсолютну величину, меншу за вибраний пороговий рівень. Потім, використовуючи трансформовані таким чином коефіцієнти та ті ж самі фільтри, відбувається відтворення сигналу. Так виглядає найпростіша схема фільтрації даних на основі дискретного вейвлет-перетворення. Правила розрахунку вагових коефіцієнтів фільтрів, методика проведення аналізу та синтезу сигналу, побудова операторів трансформації, отриманих у результаті аналізу коефіцієнтів, детально розглянута в численних літературних джерелах [1; 2; 4; 8].

Виконаємо за описаним алгоритмом подавлення високочастотних завад для сигналу, що був записаний, наприклад, першим каналом шестивагильного пластового нахиломіра НП-6 (рис. 1). Як вейвлет-функцію використаємо вейвлет Добеші (Daubechies) четвертого порядку (db4). Для порівняння наведемо також результат використання фільтрації на основі дискретного перетворення Фур'є (рис. 2).

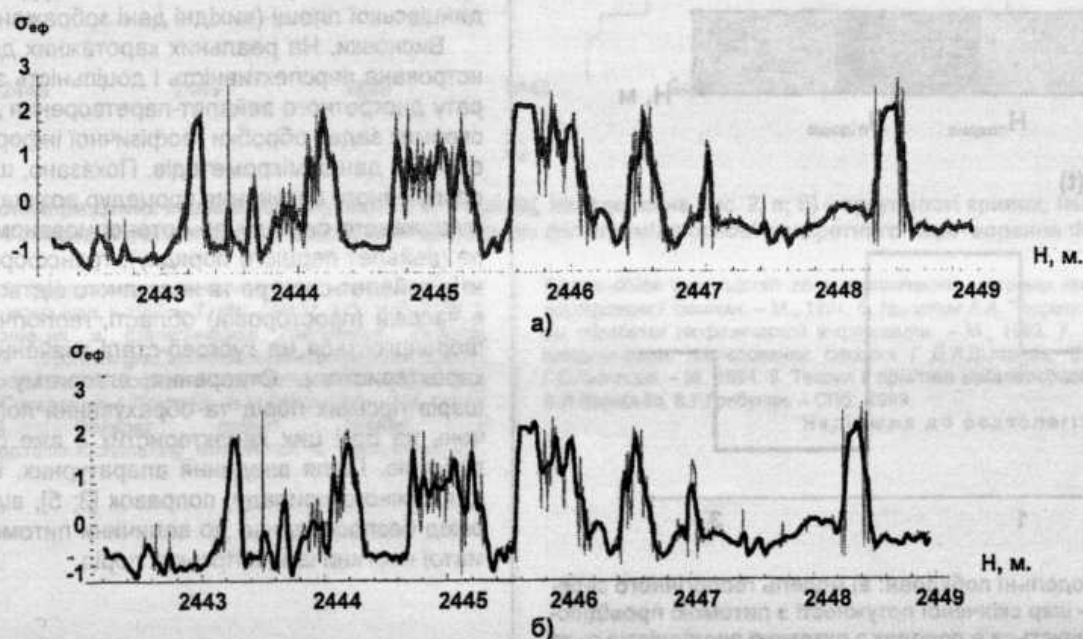


Рис. 2. Демонстрація результатів подавлення високочастотних завад на основі різних підходів:

а) фільтрація даних із використанням дискретного перетворення Фур'є; б) фільтрація даних із використанням дискретного вейвлет-перетворення. Результат фільтрації в обох випадках показаний жирною лінією

Як видно з рис. 2, обидва методи демонструють досить непогані результати. Можна підмітити, що при цьому фільтрація на основі дискретного перетворення Фур'є дає більш згладжений результат за рахунок втрат деяких особливостей вихідного сигналу; результат фільтрації на основі дискретного вейвлет-перетворення, у свою чергу, значною мірою залежить від вибору типу вейвлета, і тут необхідно керуватися певними уявленнями про фізичну природу корисного сигналу і завад. Взагалі ж, на етапі видалення високо-частотних завад можна з успіхом застосовувати як один, так і другий підхід. Вибір за дослідником.

Для подальшого проведення попередньої обробки записаних даних необхідно зупинитися на модельних побудовах геологічного середовища, що вивчається, та форми теоретичного сигналу, що відповідає заданій моделі. Прийmemo за основу плоскошарувату модель, тобто в інтервалі перетину свердловиною шару гірської породи поверхні підосви та покрівлі шару є площинами. Припустимо також, що кут між нормаллю до площини покрівлі чи підосви шару та віссю свердловини є значно меншим за 90° . Шари, які складають геологічний розріз, охарактеризуємо двома параметрами: видимою потужністю та питомим опором. Уявімо собі шар гірської породи обмеженої потужності із питомою провідністю σ_1 , який розташований у вміщуючих породах з питомою провідністю σ_2 (будемо оперувати із поняттям питомої провідності, оскільки в приладі реалізований метод МЕТМ). На рис. 3, а зображена така модель, а також відповідна функція зміни питомої провідності.

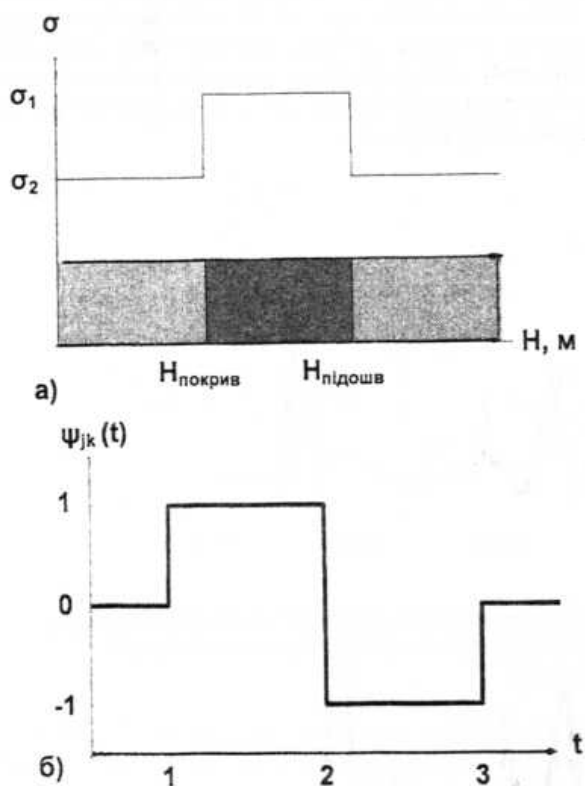
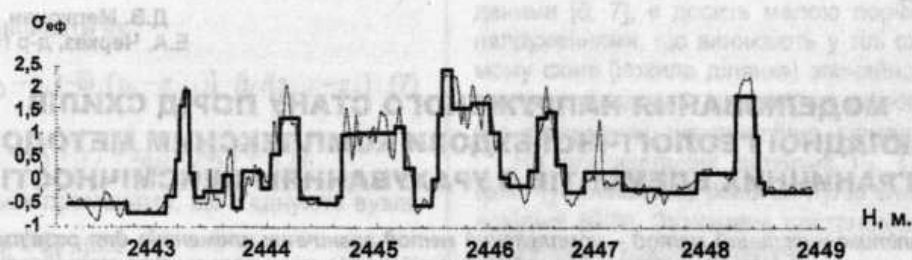


Рис. 3. Модельні побудови: а) модель геологічного середовища – шар скінченної потужності з питомою провідністю σ_1 вміщується в породах з питомою провідністю σ_2 та відповідна функція зміни питомої провідності; б) вейвлет-функція Хаара, за допомогою якої реальні криві приводяться до модельних

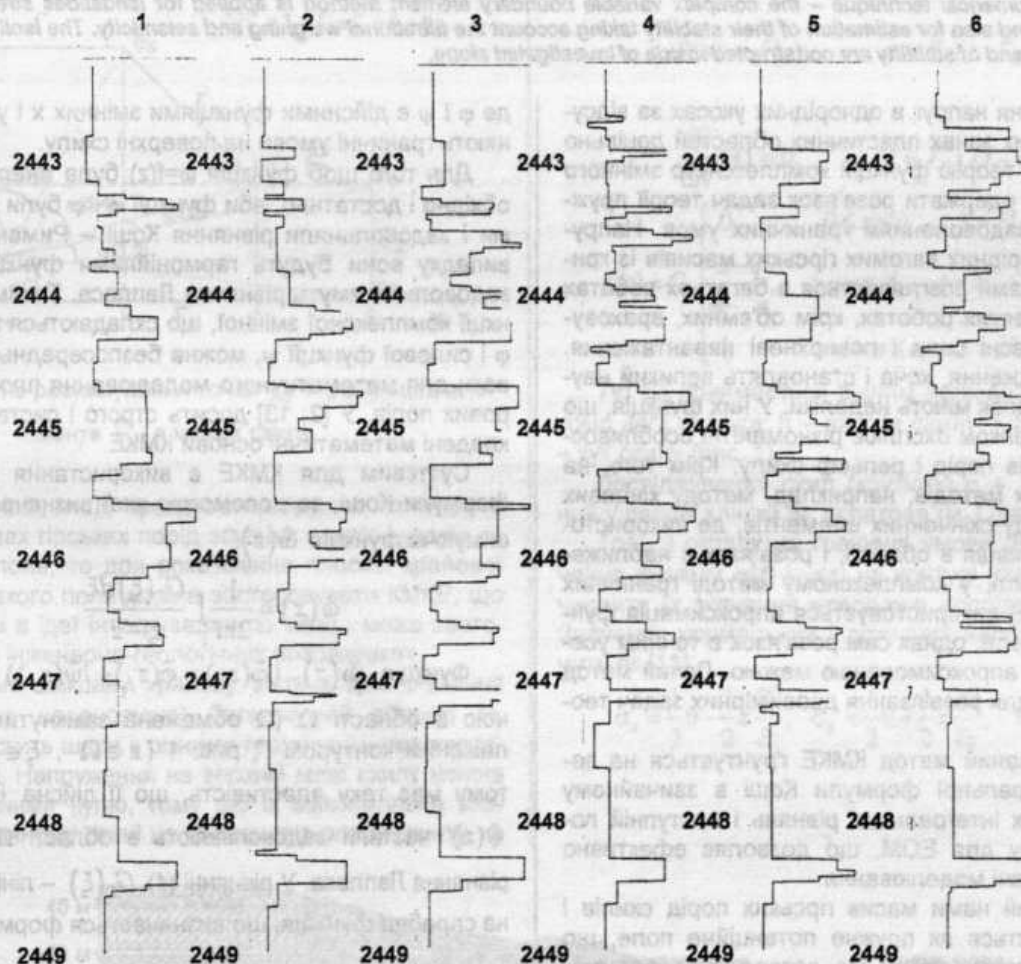
Оскільки мікрозонди мають невеликі лінійні розміри, то центральний екранований електрод можна вва-

жати практично точковим. Отже, за найсприятливіших умов проведення вимірів у свердловині (за відсутності всіх можливих джерел завад), ми повинні були б отримати криві, дуже подібні до модельних, тобто практично ступінчаті характеристики. Не маючи змоги усунути джерела завад фізично або якимось іншим чином врахувати їх, можемо спробувати наблизити записані практичні криві до модельних шляхом певних трансформацій вихідних даних. Знову повертаючись до порівняння процедур аналізу-синтезу на основі перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення, одразу зауважимо, що використання перетворення Фур'є для синтезу прямокутного сигналу призводить до появи значних флуктуацій синтезованої функції в області розриву (на межі двох шарів з різними значеннями питомої провідності). Це явище відоме під назвою ефект Гібса. З іншого боку, якщо намагатися наблизити записані криві до модельних шляхом фільтрації, то, вочевидь, використовуючи цифрові фільтри на основі дискретного перетворення Фур'є, не вдасться зробити гарної апроксимації – криві будуть занадто згладженими. У такому випадку втратиться інформація про певні особливості кривих, а процес зняття відліків не полегшиться. Означені проблеми не властиві для вейвлет-перетворення. Як зазначалося вище, підкреслити певні особливості сигналу можна за умови вибору відповідної вейвлет-функції. Ще на початку минулого століття Хааром була описана повна ортонормальна система базисних функцій з локальною областю визначення (тепер вони називаються вейвлетами Хаара, або, більш загально, db1). Вейвлет Хаара зображений на рис. 3, б. Використаємо цей вейвлет для апроксимації вже очищеного від завад сигналу модельною ступінчатою функцією за описаним вище алгоритмом квадратурно-дзеркальної фільтрації. Результат наведений на рис. 4, а для вибраного раніше сигналу (див. рис. 2), а на рис. 4, б представлений результат попередньої обробки запропонованим підходом даних, що були записані приладом НП-6 в свердловині № 4 Гнединцівської площі (вихідні дані зображені на рис. 1).

Висновки. На реальних каротажних даних продемонстрована перспективність і доцільність залучення апарату дискретного вейвлет-перетворення до розв'язання окремих задач обробки геофізичної інформації, зокрема обробки даних мікрометодів. Показано, що в результаті послідовного виконання процедур розкладу попередньо згладженого сигналу по ортонормованому базису Хаара (вейвлет першого порядку), трансформації коефіцієнтів вейвлет-спектра та наступного відтворення сигналу в часовій (просторовій) області, геологічний розріз диференціюється на кусково-сталі значення вимірюваної характеристики. Створення алгоритму відбиття меж шарів гірських порід та обрахування поплавових значень на базі цих характеристик є вже суто технічною роботою. Після введення апаратних, індивідуальних для кожного приладу, поправок [3; 5], відбувається перехід безпосередньо до величини питомого опору промитої частини шарів гірських порід.



а)



б)

Рис. 4. Аппроксимация данных модельной функцией: а) – кривой, наведенной на рис. 2, а; б) – совокупности кривых, наведенных на рис. 1. Усі криві були попередньо згладжені цифровим фільтром на основі дискретного перетворення Фур'є

1. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. // Успехи физических наук – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145–1170. 2. Вейвлеты, аппроксимация и статистические приложения. Перевод К.А. Алексеева // <http://www.grsu.by/matlab/wavelet/book6/index.asp.htm>. 3. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин. Справочник / Под ред. В.М.Добрынина. – М., 1988. 4. Киселёв А. Вейвлет своими руками // http://www.basegroup.ru/filtration/making_wavelet.htm 5. Латышова М.Г.

Практическое руководство по интерпретации диаграмм геофизических исследований скважин. – М., 1991. 6. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М., 1986. 7. Общий курс геофизических исследований скважин / Д.И.Дьяконов, Е.И.Леонтьев, Г.С.Кузнецов. – М., 1984. 8. Теория и практика вейвлет-преобразования / В.И.Воробьев, В.Г.Грибунин. – СПб., 1999.

Надійшла до редколегії 21.12.04