

Автоматизований спосіб визначення неузгодженого залягання геологічних горизонтів за тривимірними сейсмічними даними

Д. М. Гринь, 2019

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 11 липня 2019 р.

В сложных геологических средах картирование разломов по волновому сейсмическому полю часто бывает затруднительным. В алгоритме предварительной обработки сейсмических данных присутствует пространственное суммирование трас, что приводит к «размыванию» точного места нахождения разлома. Предлагается автоматизированный способ выделения разломов в трехмерном массиве сейсмических данных логарифмических декрементов затухания (ЛДЗ), которые получены при решении обратной задачи сейсмологии. Разрешающая способность данных ЛДЗ сопоставима с разрешающей способностью исходных сейсмических записей. В результате этого, анализ проводится не только с учетом отражающих особенностей среды, но и с ее поглощающими свойствами. Резкое изменение поглощения на незначительном пространственном интервале является хорошим идентифицирующим атрибутом наличия несогласного наклонно-вертикального залегания геологических горизонтов. Глубинное и пространственное распространение выделяемых разломных структур является дополнительным аргументом, подтверждающим их существование.

В качестве примера используются материалы детальной сейсмической съемки МОГТ 3D, проведенной «Укргеофизикой» на тонкослоистом шахтном поле шахты «Краснолиманская». Геологический разрез этого участка характеризуется повышенной сложностью из-за присутствия надвиго-сдвиговых геологических структур, связанных с растяжением и последующим сжатием этих территорий, что привело к появлению большого количества глубинных разломов и локальных трещин.

В консолидированной геологической среде градиент изменения логарифмического декремента затухания будет незначительным и функция поглощения состоит, в основном, из низкочастотных гармоник. Наличие же сдвиговых разломов приводит к резкому изменению поглощающих свойств среды и появлению локальных высокочастотных колебаний. Наличие таких слабоамплитудных нестационарных процессов в гармонических функциях можно обнаружить, используя вейвлет анализ. Таким образом, в публикации представлен метод, дающий возможность в автоматическом режиме отыскивать зоны разуплотнения, связанные с разломами в трехмерных данных 3D ОГТ, шахтного поля «Краснолиманская» площадью в 5,25 км² и состоящих почти из 27,5 млн значений, которые отображают различные физические свойства среды.

Ключевые слова: сейсмика, разлом, трещина, надвиг, вейвлет анализ, логарифмический декремент поглощения.

Вступ. Розломи утворюються в результаті формування більшості геологічних структур — міжблокових зсувів, насувів і скидів, зон стискання, грабенів і складок. У статті [Гринь, 2019] описано можливості виявлення місця розлому та встановлення

величини амплітуд зміщення монолітних блоків з використанням як основного ідентифікатора локальних змін дисипативних властивостей середовища, отриманих у результаті розв'язку оберненої динамічної задачі сейсмології, а саме обчислення

часових даних логарифмічних декрементів згасання (ЛДЗ) [Гринь, 2001а]. За умови достатньої роздільної здатності сейсмічних даних можливий експрес-аналіз певних ділянок сейсмічного профілю з метою визначення видимих структурних колізій для розв'язання певних задач двовимірної сейсмічної розвідки. Це, наприклад, побудова вишукувальних профілів інженерної сейсміки, приповерхневих профілів спільної глибинної точки (СГТ) з метою вивчення зони малих швидкостей, проведення сейсмічних робіт за методом спільної глибинної точки (МСГТ) для пошуку корисних копалин або детальних робіт за профілями ГСЗ.

Спосіб пошуку місця неузгодженого залягання геологічних горизонтів, запропонований у статті, використовує високу роздільну здатність часових даних ЛДЗ та можливість виділення слабо амплітудних та нестаціонарних явищ у функції поглинання за допомогою вейвлет аналізу. Під неузгодженим заляганням розуміється наявність контакту між двома геологічними структурами з різними фізичними властивостями. Така неузгодженість може виникати як у наслідок ерозійних процесів з подальшим накопиченням різновікових геологічних горизонтів, так і механічних, з формуванням складок, розломів, тріщин та зон вклинювання.

У даній статті об'єктом дослідження будуть розломні зони з різним кутом падіння,

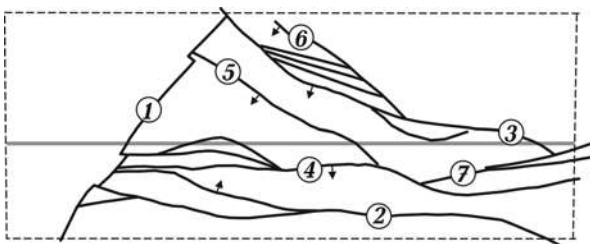


Рис. 1. Схема розташування часового зрізу (профіля інлайн 80, показано сірою лінією) і розміщення основних геологічних структур, що формують розломні зони: 1 — Центральний насув; 2 — Глибокоярський скид; 3 — Грачевський скид; 4 — Федорівський скид; 5 — скид 6; 6 — скид 5; 7 — Грушевський скид. Штриховою лінією позначено район проведення сейсмічних робіт за МСГТ 3Д.

які утворились у результаті скидів, насувів та зсувів геологічних порід.

Використання вейвлет-аналізу для розв'язання сейсмічних задач. У 1982 р. J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau і D. Giard в журналі «Geophysics» опублікували математичний метод, альтернативний класичному спектральному аналізу, основою якого є перетворення Фур'є [Morlet et al., 1982а,б]. Цей метод був розроблений і вперше використаний саме для вивчення особливостей сейсмічного хвильового поля. Термін «wavelet» став загальноживаним з 1984 р., його автором є Жан Морле (Morlet). На сьогодні вейвлет-перетворення є інструментом прикладних досліджень практично в усіх природничих науках. Його використовують у теоретичній та прикладній математиці для розв'язання рівнянь математичної фізики, квантової теорії поля, в радіофізиці, акустиці, біології, медицині, економіці. Основні напрями використання вейвлетів висвітлено в книзі «Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications (Wavelet Analysis and Its Applications)» (під редакцією Charles K. Chui). Книга складається з 22 розділів, авторами яких є фахівці різних галузей науки. Один з розділів написаний Efi Foufoula-Georgiou і Praveen Kumar і присвячений застосуванню вейвлетів у геофізиці [Foufoula-Georgiou, Kumar, 1994].

У сейсміці цей математичний апарат використовують для розв'язання багатьох задач, які умовно можна розділити на три великі групи. Перша група — видалення хвиль-завад різного генезису із сейсмічних записів. В основному мова йде про малоамплітудні нестаціонарні високочастотні шуми (завади) [Chakraborty, Okaya, 1995; Chen, Fomel, 2014a; Shuchong, Xun, 2014]. До хвиль-завад відносять і поверхневі хвилі, цуг яких накриває відбиті корисні хвилі. Видалення поверхневих хвиль Релея, Лява, Стоунлі надзвичайно важливе для задач інженерної геофізики, де довжина вишукувальних профілів є незначною [Roueff et al., 2004; Bentaleb et al., 2010; Liu, Fomel, 2013; Fajardo, Reyes, 2015]. Друга велика група задач, в яких використовують вейвлет-перетворення, — підвищення роздільної

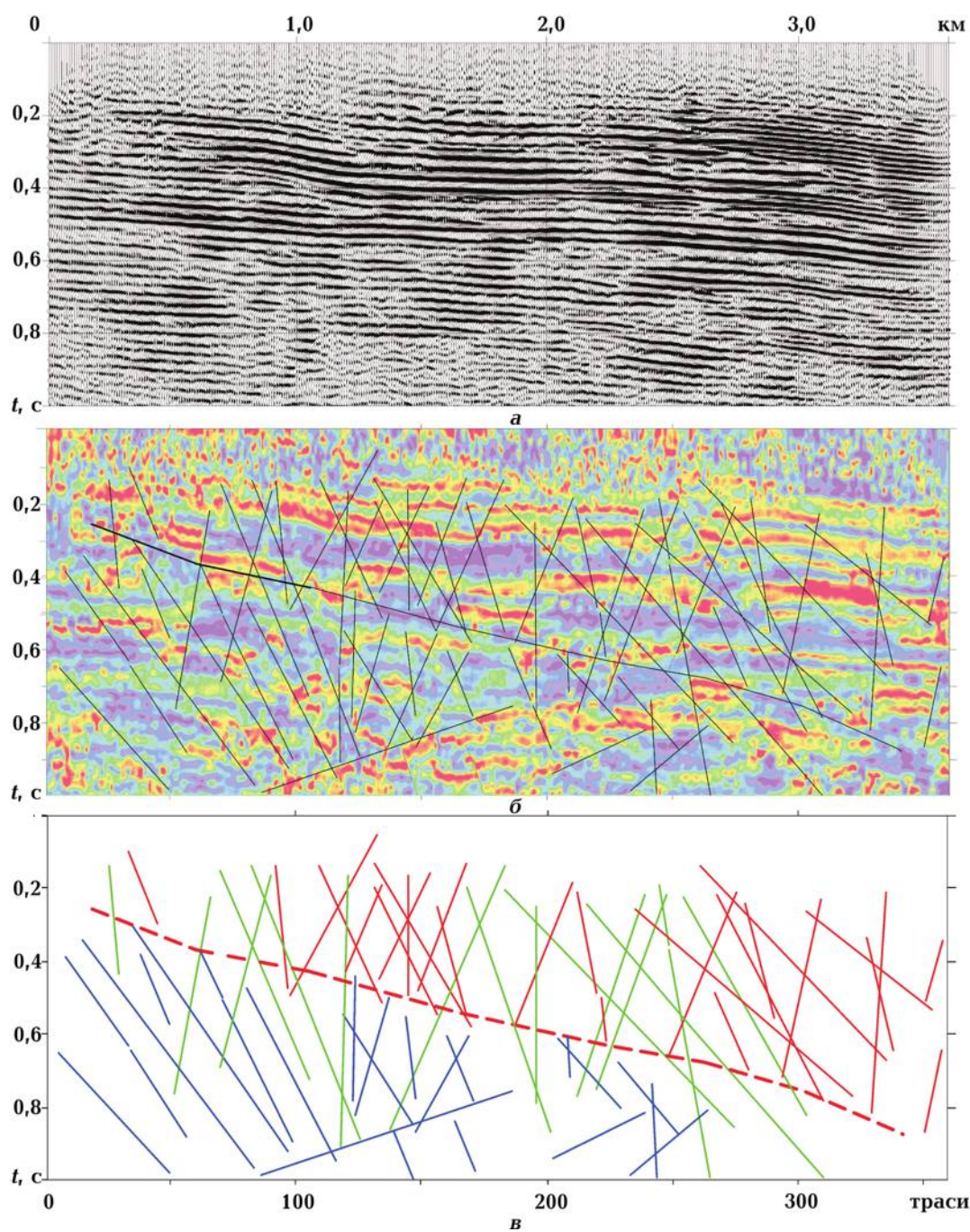


Рис. 2. Вертикальний часовий зріз сейсмічного хвильового поля МСГТ 3D, отриманого на шахтному полі шахти «Краснолиманська»: а — профіль інлайн 80; б — часовий розріз логарифмічних декрементів згасання, обчислений за даними МСГТ 3D; в — видимі розломи. Пояснення див. у тексті.

здатності сейсмічних даних. Ідея полягає у часовому звуженні елементарного сигналу сейсмограми, яка є згортою імпульсної характеристики середовища та елементарного сигналу, сформованого середовищем. У такий спосіб елементарний сигнал наближають за формою до функції Дірака,

що візуально підвищує роздільну здатність сейсмічного запису [Innanen 2013; Rivera-Recillas et al., 2005; Pawelec et al., 2019]. Третя група задач — вивчення спектрального складу сейсмічних хвиль, відбитих від нафто- або газонасичених горизонтів, для яких використовують можливість вейвле-

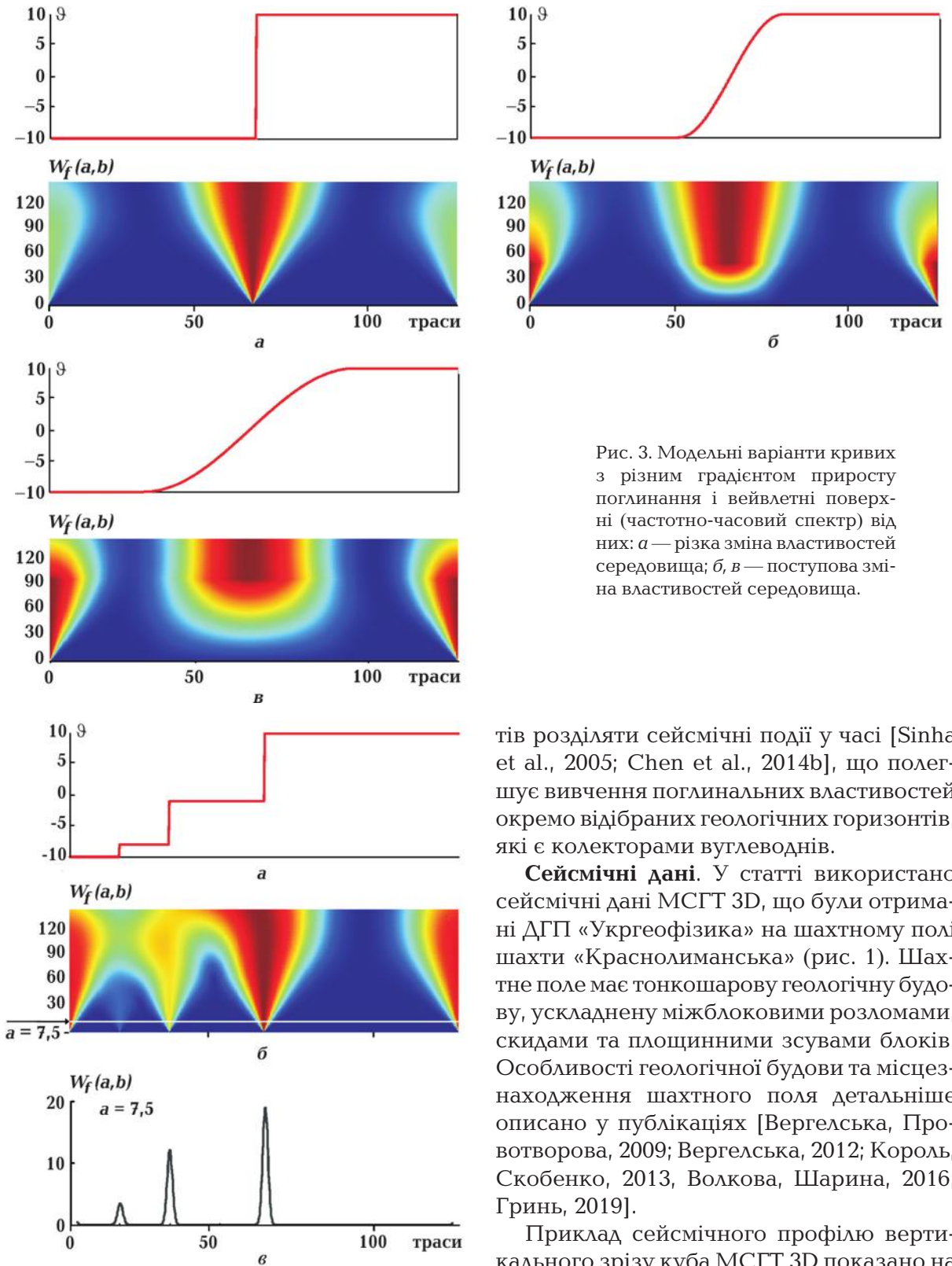


Рис. 3. Модельні варіанти кривих з різним градієнтом приросту поглинання і вейвлетні поверхні (частотно-часовий спектр) від них: *а* — різка зміна властивостей середовища; *б, в* — поступова зміна властивостей середовища.

тів розділяти сейсмічні події у часі [Sinha et al., 2005; Chen et al., 2014b], що полегшує вивчення поглинальних властивостей окремо відібраних геологічних горизонтів, які є колекторами вуглеводнів.

Сейсмічні дані. У статті використано сейсмічні дані МСГТ 3D, що були отримані ДГП «Укргеофізика» на шахтному полі шахти «Краснолиманська» (рис. 1). Шахтне поле має тонкошарову геологічну будову, ускладнену міжблоковими розломами, скидами та площинними зсувами блоків. Особливості геологічної будови та місцезнаходження шахтного поля детальніше описано у публікаціях [Вергелська, Провоторова, 2009; Вергелська, 2012; Король, Скобенко, 2013, Волкова, Шарина, 2016; Гринь, 2019].

Приклад сейсмічного профілю вертикального зрізу куба МСГТ 3D показано на рис. 2, *а*, обрахований профіль логарифмічних декрементів згасання — на рис. 2, *б*. Часові дані ЛДЗ дають змогу впевнено виділяти більшість розломів, генетично

Рис. 4. Модель кривої поглинання, характеристики якої різко змінюються з глибиною: *а* — модельна крива; *б* — частотно-часовий спектр; *в* — зріз частотно-часового спектра, коефіцієнт $a=7,5$.

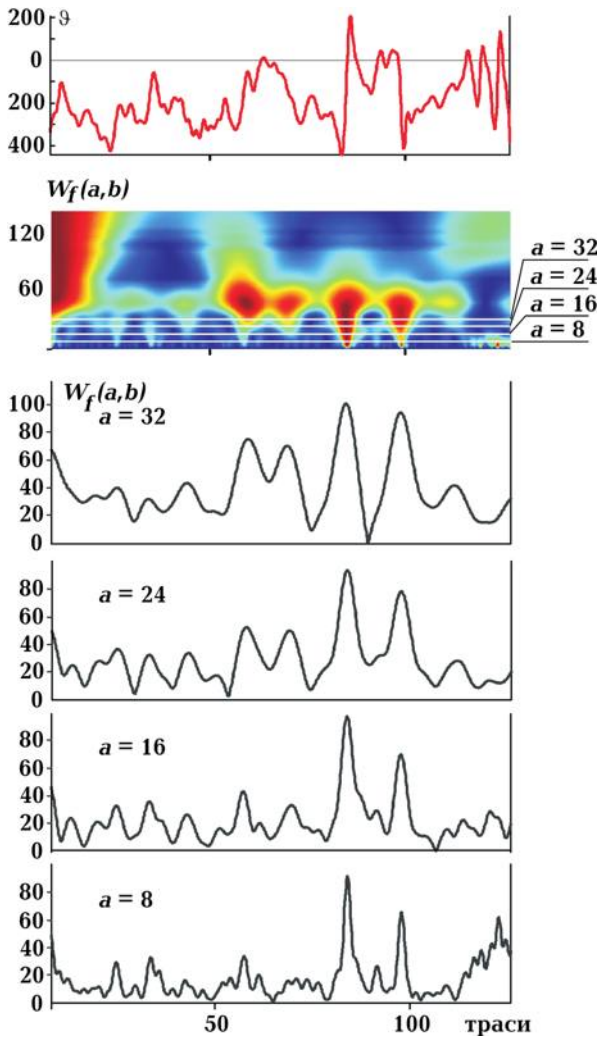


Рис. 5. Приклад розкладання на вейвлет-складові фактичної кривої ЛДЗ, отриманої з 150 cross-line перересних ліній за даними СГТ 3D.

пов'язаних з Центральним насувом шахтного поля (червона штрихова лінія), та сформовану ним групу скидів, зокрема Федорівський та Грушевський (рис. 2, в). Виділені розломи позначено лініями різних кольорів. Червоні суцільні лінії — розломи над площиною Центрального насуву, що утворилися в геологічному середовищі в результаті вертикального насувного руху. Сині лінії — розломи, сформовані під впливом сил розтягування і характерні для порід, що залягають нижче площини Центрального насуву. Зелені лінії — група розломів, можливо, пов'язаних зі складними глибинними тектонічними рухами.

З урахуванням необхідності встановлення площинного, тобто тривимірного, поширення тектонічних порушень постає питання щодо створення методики для автоматизованої кореляції порушень у просторі. В числовому зображенні куб СГТ 3D шахтного поля «Краснолиманська» — це тривимірна матриця, яка складається з 27 436 000 чисел, які відображають фізичні властивості середовища. Такий обсяг інформації якісно можна обробити, застосувавши тільки автоматизований режим пошуку та просторової локалізації розломних зон, тобто метод, який би підкреслив локальні особливості нестационарних процесів, а саме різку появу височастотної компоненти у функції поглинання на дуже малому інтервалі простору.

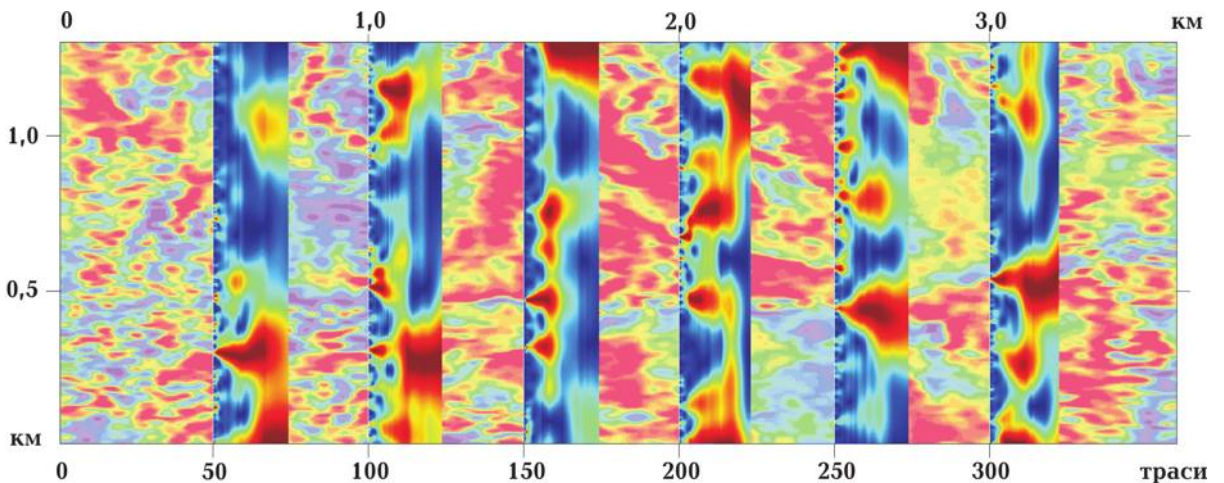


Рис. 6. Приклад пошуку розломних зон за допомогою вейвлет-аналізу. Показано частотно-часові вейвлет-спектри від крос-ланів: 50, 100, 150, 200, 250, 300 трас, які накладено на горизонтальний зріз куба ЛДЗ 3D.

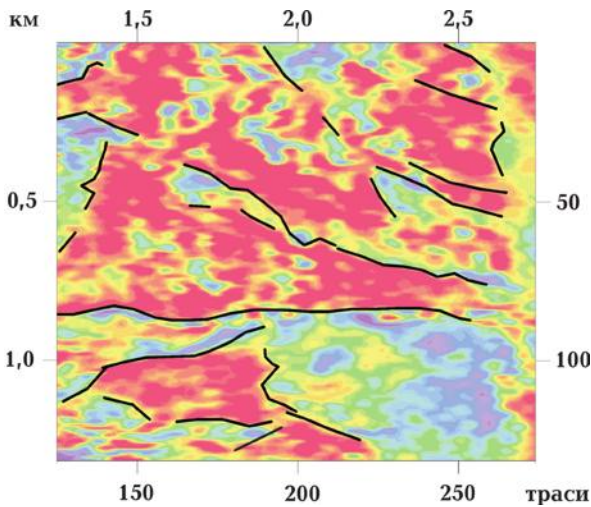


Рис. 7. Результат автоматизованого пошуку розломних зон частини горизонтального зрізу площею у 4,5 км². Чорними лініями виділено зони з максимально високим градієнтом зміни поглинаючих властивостей, що відображають глибинні розломи.

Використання спектрального аналізу Фур'є-перетворення для пошуку розломів за даними ЛДЗ. Після експериментів з перетворенням Фур'є зроблено висновок щодо його непридатності для визначення локальних особливостей часових функції ЛДЗ (пов'язаних з аномаліями від розломних зон), оскільки спектральні коефіцієнти прямого перетворення Фур'є обчислюють інтегруванням за вибраним інтервалом сейсмічного запису, що призводить до «розмивання» шуканих особливостей. Наступний недолік — для відтворення різких перепадів амплітуд у даних ЛДЗ (як у нашому дослідженні) потрібна безмежна кількість членів ряду. Обмеження кількості членів ряду викликає появу ефекту Гіббса в межах різких стрибків функції, тобто осциляції, яка є додатковою завадою:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Також було випробувано відомий метод віконного перетворення Фур'є, за яким спектральну характеристику обчислюють у рухомому обмеженому часовому вікні [Іванов, 2004]. У такий спосіб відбувається умовний перехід до частотно-координатного зображення сигналів:

$$F(\omega, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} \psi(t-b) dt,$$

де $\psi(t-b)$ — локальна віконна функція, що рухається уздовж часової осі для обчислення перетворення Фур'є у визначених точках b .

Для зменшення ефектів Гіббса використовували функції Гауса і Барлета. Роздільну здатність перетворення Фур'є, обернено пропорційну частотній роздільній здатності, визначають за шириною віконної функції. Для збільшення точності визначення положення стрибкоподібної частини функції необхідно зменшувати розміри вікна, що знижує частотну роздільність методу [Гринь, 2001б]. Унаслідок енергетичної слабкості височастотної компоненти через зашумленість такими компонентами іншого походження процес пошуку місця розлому цим методом є малоефективним і не технологічним.

Використання вейвлет-аналізу для автоматичного режиму пошуку розломів. Вейвлетний аналіз — це особливий тип лінійного перетворення сигналів і фізичних даних. Базис власних функцій, за яким виконують вейвлетне розкладання сигналів, має багато специфічних властивостей і можливостей. Базисні функції, які називають вейвлетами, дають змогу зосередити увагу на локальних особливостях функції поглинання, що не можуть бути виявлені традиційними перетвореннями Фур'є і Лапласа [Астафьева, 1996]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right).$$

Тут змінна b відповідає за зміщення вейвлету за часом, змінна a — за вибір значення частоти (масштабу). Малі значення a відповідають високим частотам, великі — низьким. Множник $1/\sqrt{a}$ забезпечує незалежність норми цих функцій від масштабувального числа a [Приоров, 2011].

Вейвлети мають вигляд коротких хвильових пакетів з нульовим середнім значенням, локалізованих за віссю аргументу (незалежних змінних), інваріантних до

зсуву і лінійних до операції масштабування (стискання або розтягнення). За локалізацією у часовій і частотній областях вейвлети займають проміжне положення між гармонічними функціями, локалізованими за частотою, і функцією Дірака, локалізованої за часом.

Неперервне пряме вейвлет-перетворення має вигляд скалярного добутку часової функції $f(t)$ і базисних функцій:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt .$$

Основна сфера застосування вейвлетних перетворень — аналіз і обробка сигналів та функцій, нестационарних у часі або неоднорідних у просторі, коли результати аналізу мають складатися не тільки з частотної характеристики функції (розподілу енергії сигналу за частотними складовими), а й з інформації про локальні координати, на яких проявляються ті чи інші групи частотних складових або на яких швидко змінюються частотні складові сигналу. Порівняно з розкладанням сигналів на ряди Фур'є вейвлети здатні з набагато вищою точністю визначати локальні особливості сигналів, навіть розривів 1-го роду (стрибка) [Левкович-Маслюк, 1999; Новиков, 1999]. На відміну від перетворення Фур'є вейвлет-перетворення одновимірних сигналів забезпечує двовимірну розгортку, причому частоту і координату розглядають як незалежні змінні, що дає змогу аналізувати часові функції відразу у двох просторах.

Вейвлети функцій, ускладнених нестационарними (стрибкоподібними) процесами. У функції поглинання нестационарний процес виникає за різкої зміни поглинальних властивостей середовища на малій відстані. Така особливість поведінки поглинання виникає внаслідок контакту двох блоків, діаметрально протилежних за фізичними властивостями. Чим більша різниця у поглинанні, тим значніша амплітуда коливання функції. Така чітка відмінність у поглинальних властивостях добре проявляється у часовому полі ЛДЗ, практично по

всьому периметру існування Глибокоярського і Федорівського скидів (див. рис. 1).

Для того щоб визначити можливість виділяти нестационарний процес за допомогою вейвлет-аналізу, змодельовано теоретичні криві поглинання від двох блоків (червоні лінії), що розміщені поруч і мають різне поглинання енергії сейсмічних хвиль (рис. 3). Під кожною з моделей розташовано її частотно-часовий спектр, обчислений за вейвлет-перетворенням (див. рис. 3).

Незважаючи на крайові ефекти, що виникають на першій і останній трасах, бачимо, що в околі стрибка функції на вейвлет-спектрі наявні високочастотні складові, що відповідають малим значенням $(a_n)_{n=0}^{10}$. Таким чином, наявність нестационарного процесу відображається червоно-жовтими кольорами частотно-часового спектра в області малих значень a . За малих градієнтів зміни поглинальних властивостей середовища високочастотна складова повністю відсутня (синьо-блакитні кольори) і фіксується лише низькочастотна складова функції поглинання, починаючи з $(a_n)_{n=10}^{50}$.

На рис. 4 зображено функцію з різкою зміною значень, як це відбувається на межі трьох різних блоків. З огляду на амплітуди частотно-часового спектра доходимо висновку, що збільшення різниці у величинах функції приводить до збільшення амплітуд спектрів, тобто проявляються не лише кількісні, а й якісні можливості вейвлет-перетворень.

На рис. 5 показано результат вейвлет-аналізу кривої ЛДЗ горизонтального зрізу куба 3D. Максимальні значення спектрів (червоний колір на частотно-часовому спектрі) розміщуються в діапазоні максимальної зміни величини функції ЛДЗ. Поблизу траси 350 розташована ділянка з малою енергією високочастотних компонент. Це означає, що властивості на цій ділянці змінюються поступово. Така поведінка характерна для полого нахилених горизонтів, де горизонтальний зріз розрізає відносно однорідне середовище. Відсутність високочастотних компонент засвідчує цілковиту однорідність середовища на значній ділянці сейсмічного розрізу. Ці ділянки

можна вважати монолітними структурами.

Аналіз поєднання горизонтального зрізу на Краснолиманській площі (рис. 6) і частотно-часових вейвлет-спектрів показав, що положення максимальних за енергією спектральних високочастотних компонент повністю збігається з глибинними розломами, сформованими Глибокоярським, Федорівським, та іншими скидами (див. рис. 1). Ці точки збігу можуть бути використані як реперні точки переходу від однієї геологічної структури до іншої.

На першому етапі пошуку розломів необхідно видалити стаціонарні та нестаціонарні хвилі завади, які завжди присутні у сейсмічному хвильовому полі. Зазвичай вони є залишками поверхневих хвиль, або артефактами від міграції. Бажано використовувати методи видалення хвиль звад, які не мають нелінійних процедур і не вносять зміни в амплітудно-частотну характеристику хвильового процесу [Гринь, Гринь, 2003].

На другому етапі обчислюємо обернену задачу сейсміки і знаходимо логарифмічні декременти згасання. У результаті цього переходимо від хвильового поля до структурованого за поглинаючими властивостями геологічної будови середовища, де виділяються окремі блоки, розломи, зсуви. На третьому етапі розкладаємо криві ЛДЗ на просторово-частотні складові. Згідно з рис. 5, малі значення масштабуючого числа α відповідають високочастотним складовим вейвлет-функції і асоціюються з сильноамплітудними розломами. Пошук просторова та глибинна прив'язка таких реперних точок у автоматичному режимі є основним завданням обробки даних на цьому етапі.

На рис. 6 для прикладу приведено результати обробки профілів крос-лайн довжиною 1,5 км (Y — координата). Найпомітнішими є розломи, які перетинають профілі під прямим кутом. Тому бажано використовувати також профілі онлайн, у нашому випадку довжиною 3,5 км (X — координата). Результати виділення розломів у часовому полі ЛДЗ за двома напрямками показані на рис. 7. За необхідності деталь-

ного вивчення певної геологічної ділянки можна формувати з тривимірної матриці сейсмічних даних спеціальні профілі, перпендикулярні до обраних розломів.

Куб сейсмічних даних МСГТ 3D (по осі Z) складається з 500 горизонтальних часових зрізів. Визначаючи положення розломів на кожному з них, формуємо просторову картину розташування можливих розломних зон. Їхня присутність на більшій глибині (більшому часі) дає змогу побудувати з реперних точок площину розлому, яка простягається у глибину на сотні метрів.

Висновки. В результаті обробки куба 3D за методом логарифмічних декрементів згасання з метою виявлення геологічних розломів і тріщинуватих зон різного генезису отримано таке.

1. Запропоновано автоматизований метод пошуку нестаціонарних процесів у функціях логарифмічних декрементів згасання, які пов'язані з розломними зонами. Доведено, що вейвлетні перетворення під час використання їх для обробки функцій поглинання мають всі переваги щодо перетворення Фур'є.

2. Вейвлетні базили можуть бути добре локалізованими як за частотою, так і за часом. Це дає змогу виділяти лише цільові нестаціонарні процеси з метою вивчення обраних об'єктів дослідження.

3. Вейвлетні базили, на відміну від перетворення Фур'є, мають багато різноманітних базових функцій, властивості яких орієнтовані на розв'язання різних задач.

4. Виділення за допомогою вейвлетних перетворень нестаціонарного процесу (у статті — різка зміна поглинальних властивостей середовища) має достатню точність.

5. Наявність високочастотних компонент у частотно-часовому спектрі вказує на швидку зміну поглинальних властивостей, відсутність високочастотної складової — на поступовість зміни поглинальних властивостей, що характерно для нахилених горизонтально-шаруватих середовищ.

Такі особливості частотно-часового спектра дають змогу використовувати вейвлет-аналіз для автоматичного пошуку

у тривимірному масиві сейсмічних хвиль зон порушень у геологічних пластах і для побудови тривимірних матриць з інфор-

мацією про локалізацію лише розломів і тріщин або для пошуку монолітних блоків без прояву нестационарних процесів.

Список літератури

- Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры и примеры применения. *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145—1170. doi.org/10.3367.UFNr.0166.199611a.1145.
- Вергельська Н. В., Провотворова О. В. Особливості геологічної будови окремих вугільних пластів Красноармійського вуглепромислового району (на прикладі шахти Краснолиманська). *Тектоніка і стратиграфія*. 2009. Вип. 36. С. 54—59.
- Вергельська Н. В. Особливості будови пласта ІЗ Красноармійського вуглепромислового району Донецького басейну. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2012. Вип. 5. С. 206—208.
- Волкова Т. П., Шарина О. С. Закономерности распределения природной газонасности на шахтах Красноармейского углепромышленного района. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2016. № 2(39). С. 3—9.
- Гринь Д. М. Базисні функції, спектральна корекція та обвідні сейсмічних трас. *Геофиз. журн.* 2001а. Т. 23. № 3. С. 95—105.
- Гринь Д. М. Логарифмічні декременти та інші функції згасання сейсмічних хвиль. *Геофиз. журн.* 2001б. Т. 23. № 4. С. 91—102.
- Гринь Д. М. Методика визначення просторового поширення малоамплітудних розломів і тріщин у тонкошаруватому вуглевмісному геологічному середовищі. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 5. С. 234—249. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183644.
- Гринь Д. М., Гринь М. Є. Різницеві оператори для виділення цільових хвиль. *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 4. С. 84—97.
- Иванов М. А. Применение вейвлет-преобразований в кодировании изображений. *Новые информационные технологии в науке и образовании*. 2004. № 24. С. 157—175.
- Король В. И., Скобенко А. В. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах. Днепропетровск: Изд. НГУ, 2013. 181 с.
- Левкович-Маслюк Л., Переберин А. Введение в вейвлет-анализ: Учебный курс. Москва: ГрафиКон'99, 1999. 120 с.
- Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд. ИАП РАН, 1999. 152 с.
- Приоров А. Л., Волохов В. А., Апальков И. В. Обработка сигналов на основе вейвлет-преобразования: Методические указания. Ярославль: Изд. Ярослав. гос. ун-та, 2011. 44 с.
- Bentaleb, Y., El Hajji, S., & Orhanou, G. (2010). A Wavelets Algorithm for the Seismic Waves Alignment. *Contemporary Engineering Sciences*, 3(4), 157—166.
- Chakraborty, A., & Okaya, D. (1995). Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods. *Geophysics*, 60(6), 1906—1916. https://doi.org/10.1190/1.1443922.
- Chen, Y., Fomel, S., & Hu, J. (2014a). Iterative deblending of simultaneous-source seismic data using seislet-domain shaping regularization. *Geophysics*, 79(5), V179—V189. https://doi.org/10.1190/geo2013-0449.1.
- Chen, Y., Liu, T., Chen, X., Li, J., & Wang, E. (2014b). Time-frequency analysis of seismic data using synchrosqueezing wavelet transform. *Journal of Seismic Exploration*, 23(4), 303—312.
- Chui, C. K. (1992). *Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications (Wavelet Analysis and Its Applications)*. Academic Press; Later Printing edition, Texas A&M University, College Station, Texas, 723 p.
- Fajardo, C., Reyes, O. M., & Ramirez, A. (2015). Seismic Data Compression Using 2D Lifting-Wavelet Algorithms. *Ingeniería y Ciencia*,

- 11(21), 221—238. <http://dx.doi.org/10.17230/ingciencia.11.21.12>.
- Foufoula-Georgiou, E., & Kumar, P. (Eds.). (1994). *Wavelets in Geophysics*. Academic Press, Inc. San Diego, California, USA.
- Innanen, K. (2013). Seismic processing with continuous wavelet transform maxima. *CREWES Research Report*, 25.
- Liu, Y., & Fomel, S. (2013). Seismic data analysis using local time-frequency decomposition. *Geophysical Prospecting*, 61(3), 516—525. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2012.01062.x>.
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Glard, D. (1982a). Wave propagation and sampling theory — part 1: Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 47(2), 203—221. <https://doi.org/10.1190/1.1441328>.
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Glard, D. (1982b). Wave propagation and sampling theory — part 2: Sampling theory and complex waves. *Geophysics*, 47(2), 222—236, <https://doi.org/10.1190/1.1441329>.
- Pawelec, I., Sava, P., & Wakin, M. (2019). Wave-field reconstruction using wavelet transform. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 147—151. <https://doi.org/10.1190/segam2019-3216535.1>.
- Rivera-Recillas, D. E., Lozada-Zumaeta, M. M., Ronquillo-Jarillo, G. & Campos-Enríquez, J.O. (2005). Multiresolution analysis applied to interpretation of seismic reflection data. *Geofísica Internacional*, 44(4), 355—368.
- Roueff, A., Chanussot, J., Mars, J. I., & Nguyen, M.-Q. (2004). Unsupervised separation of seismic waves using the watershed algorithm on time-scale image. *Geophysical Prospecting*, 52(4), 287—300. doi: 10.1111/j.1365-2478.2004.00416.x.
- Shuchong, L., & Xun, C. (2014). Seismic signals wavelet packet de-noising method based on improved threshold function and adaptive threshold. *Computer Modeling and New Technologies*, 18(11) 1291—1296.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., & Castagna, J. P. (2005). Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*, 70(6), P19—P25. <https://doi.org/10.1190/1.2127113>.

Automated method for determination of geological horizons nonconformity according to three-dimensional seismic data

D. M. Gryn', 2019

In complicated geological media mapping of faults according to wave seismic field often becomes difficult. In algorithm of preliminary processing of seismic data spatial summation of traces is present that leads to «corrosion» of exact location of the fault. Automated method is proposed for identification of faults in three-dimensional body of seismic data of logarithmic decrements of fading (LDF) obtained solving of inverse problem of seismic. Resolvability of LDF data is comparable with resolving ability of initial seismic records.

As a result, the analysis is conducted not only taking into account reflecting features of the medium but also with its absorbing properties.

Abrupt change of absorption in minor spatial interval is a good identifying attribute of the presence of non-conformable lean-vertical occurrence of geological horizons. Deep and spatial distribution of identified fault structures is an additional argument supporting their existence.

We used as an example the materials of detailed seismic mapping of МОГТ 3D conducted by «Ukrgeophysisc» in thin-layer mining field of «Krasnolimanskaya» mine. Geological section of this area is specific by its complexity because of the presence of thrust-shear geological structures related to tension and subsequent compression of these territories that lead to appearance of large amount of deep faults and local fissures.

In consolidated geological medium gradient of change of logarithmic gradient of fading will become minor and function of absorption mainly consists of low-speed harmonics. The presence of shear faults leads whereas to abrupt change of absorbing properties of the medium and to appearance of local high-speed oscillations. It is possible to find out the presence of such low-amplitude non-stationary processes in harmonic functions using wavelet analysis. Therefore the paper presents a method that makes possible to find out fault-related decompaction zones in three-dimensional data 3D CDP of the mine field «Krasnolimanskaya 5,25 km² consisting of almost 27,5 million values reflecting different physical properties of the medium.

Key words: seismic, fault, fissure, thrust-fault, wavelet analysis, logarithmic decrement of absorption.

References

- Astafyeva, N. M. (1996). Wavelet Analysis: Basic Theory and Some Application. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 166(11), 1145—1170. doi.org/10.3367.UFNr.0166.199611a.1145 (in Russian).
- Vehelyanska, N. V., & Provotvorova, O. V. (2009). Features of the geological structure of individual coal seams of the Krasnoarmeysk coal-mining district (as an example of the Krasnolimansk mine). *Tektonika i stratyhrafyya*, (36), 54—59 (in Ukrainian).
- Verhelska, N. V. (2012). Features of the structure of the I3 formation of the Krasnoarmeysk coal-mining district of the Donetsk basin. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu heolohichnykh nauk NAN Ukrayiny*, (5), 206—208 (in Ukrainian).
- Volkova, T. P., & Sharina, O. S. (2016). Patterns of distribution of natural gas content in the mines of the Krasnoarmeysky coal-industrial region. *Visti Donetskooho hirnychooho instytutu*, (2), 3—9 (in Russian).
- Gryn, D. M. (2001a). Basis functions, spectral correction and bypass seismic lines. *Geofizicheskyy zhurnal*, 23(3), 95—105 (in Ukrainian).
- Gryn, D. M. (2001b). Logarithmic decrement and other features attenuation of seismic waves. *Geofizicheskyy zhurnal*, 23(4), 91—102 (in Ukrainian).
- Gryn, D. M. (2019). Methods for determination of spatial distribution of minor-amplitude faults and fissures in thin-layer coal-bearing geological medium. *Geofizicheskyy zhurnal*, 41(5), 190—205 (in Ukrainian).
- Gryn, D. M., & Gryn, M. E. (2003). Difference operators for extracting target waves. *Geofizicheskyy zhurnal*, 25(4), 84—97 (in Ukrainian).
- Ivanov, M. A. (2004). Application of wavelet transforms in image coding. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v nauke i obrazovanii*, (24), 157—175 (in Russian).
- Korol, V. I., & Skobenko, A. V. (2013). *Acoustic method for forecasting gas-dynamic phenomena in coal mines*. Dnepropetrovsk: National Mining University Edition, 181 p. (in Russian).
- Levkovich-Maslyuk, L., & Pereberin, A. (1999). *Introduction to wavelet analysis: Training course*. Moscow: Graficon'99, 120 p. (in Russian).
- Novikov, L. V. (1999). *Fundamentals of wavelet analysis of signals: a manual*. St. Petersburg: Edition Institute of Analytical Instrumentation RAS, 152 p. (in Russian).
- Priorov, A. L., Volokhov, V. A., & Apalkov, I. V. (2011). *Signal processing based on wavelet transform: Methodological instructions*. Yaroslavl: Edition of Yaroslavl State University, 44 p. (in Russian).
- Bentaleb, Y., El Hajji, S., & Orhanou, G. (2010). A Wavelets Algorithm for the Seismic Waves Alignment. *Contemporary Engineering Sciences*, 3(4), 157—166.
- Chakraborty, A., & Okaya, D. (1995). Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods. *Geophysics*, 60(6), 1906—1916. <https://doi.org/10.1190/1.1443922>.
- Chen, Y., Fomel, S., & Hu, J. (2014a). Iterative deblending of simultaneous-source seismic data using seislet-domain shaping regularization. *Geophysics*, 79(5), V179—V189. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0449.1>.
- Chen, Y., Liu, T., Chen, X., Li, J., & Wang, E.

- (2014б). Time-frequency analysis of seismic data using synchrosqueezing wavelet transform. *Journal of Seismic Exploration*, 23(4), 303—312.
- Chui, C. K. (1992). *Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications (Wavelet Analysis and Its Applications)*. Academic Press; Later Printing edition, Texas A&M University, College Station, Texas, 723 p.
- Fajardo, C., Reyes, O. M., & Ramirez, A. (2015). Seismic Data Compression Using 2D Lifting-Wavelet Algorithms. *Ingeniería y Ciencia*, 11(21), 221—238. <http://dx.doi.org/10.17230/ingciencia.11.21.12>.
- Foufoula-Georgiou, E., & Kumar, P. (Eds.). (1994). *Wavelets in Geophysics*. Academic Press, Inc. San Diego, California, USA.
- Innanen, K. (2013). Seismic processing with continuous wavelet transform maxima. *CREWES Research Report*, 25.
- Liu, Y., & Fomel, S. (2013). Seismic data analysis using local time-frequency decomposition. *Geophysical Prospecting*, 61(3), 516—525. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2012.01062.x>.
- Morlet, J., Arens, G., Farge, E., & Gland, D. (1982a). Wave propagation and sampling theory — part 1: Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 47(2), 203—221. <https://doi.org/10.1190/1.1441328>.
- Morlet, J., Arens, G., Farge, E., & Gland, D. (1982b). Wave propagation and sampling theory — part 2: Sampling theory and complex waves. *Geophysics*, 47(2), 222—236. <https://doi.org/10.1190/1.1441329>.
- Pawelec, I., Sava, P., & Wakin, M. (2019). Wavefield reconstruction using wavelet transform. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 147—151. <https://doi.org/10.1190/segam2019-3216535.1>.
- Rivera-Recillas, D. E., Lozada-Zumaeta, M. M., Ronquillo-Jarillo, G. & Campos-Enríquez, J. O. (2005). Multiresolution analysis applied to interpretation of seismic reflection data. *Geofísica Internacional*, 44(4), 355—368.
- Roueff, A., Chanussot, J., Mars, J. I., & Nguyen, M.-Q. (2004). Unsupervised separation of seismic waves using the watershed algorithm on time-scale image. *Geophysical Prospecting*, 52(4), 287—300. doi: 10.1111/j.1365-2478.2004.00416.x.
- Shuchong, L., & Xun, C. (2014). Seismic signals wavelet packet de-noising method based on improved threshold function and adaptive threshold. *Computer Modeling and New Technologies*, 18(11) 1291—1296.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., & Castagna, J. P. (2005). Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*, 70(6), P19—P25. <https://doi.org/10.1190/1.2127113>.