

УДК 550.312

І. Віршило, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: ivirshylo@gmail.com

І. Пап, асп.,

E-mail: papiryna@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ІНТЕГРОВАНЕ СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ МІНЕРАЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ЗЕМНОЇ КОРИ

(Рекомендовано членами редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б.П. Масловим та д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)

Розглянуто побудову нового алгоритму просторового моделювання речовинного складу гірських порід, що узгоджується з результатами геофізичних, петрофізичних та геохімічних досліджень. Як вхідні параметри моделі використовуються розподіли імовірності величин, що моделюються, – об'ємні концентрації породотвірних мінералів і пустотного простору та параметри термонапруженого стану середовища – тиск і температура. Визначення розподілів імовірності здійснюється шляхом статистичної обробки результатів геологічних та геохімічних досліджень для речовинного складу та введенням довірчих інтервалів для результатів геофізичних досліджень. Як розрахункові алгоритми для задач сейсмоакустики, термометрії, магнітометрії та електрометрії використовується метод умовних моментних функцій. В основі алгоритму лежить багатокомпонентна матрична модель середовища з еліпсоїдальними включеннями, яка не має обмежень на концентрацію компонентів та дозволяє враховувати довільну симетрію середовища. Результатом моделювання є статистично значуща сукупність розв'язків, які мають геологічний зміст, що обмежується розподілами імовірності концентрацій породотвірних мінералів.

Ключові слова: глибинне сейсмічне зондування, сейсмо-мінералогічні моделі, методи глобальної оптимізації, стохастичні методи, пряма задача сейсмоакустики, метод Монте-Карло, метод умовних моментних функцій.

Вступ. Дослідження глибинної будови земної кори здійснюються багатьма геофізичними методами, серед яких, з 70–80-х років ХХ ст., провідне місце посів метод глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ) (Ризниченко, 2016). У той час велось активне вивчення Балтійського щита. Дані ГСЗ, отримані за участю І.П. Космінської на профілях ФЕННОЛОРА, ПОЛЯР, БАЛТИК, СВЕКА, згодом стали основою для великомасштабних міжнародних сейсмологічних проєктів SVEKALAPKO і POLARNET на Балтійському щиті (Косминская и Давыдова, 1980; Janiketal, 2009; FENNIA Working Group, 1998; Grad and Luosto, 1994; Luosto, 1989).

Питанням інтерпретації результатів ГСЗ у контексті визначення мінерального складу кори, починаючи з кінця 80-х років, почали цікавитися W. Mooney разом із N. Christensen. Їх робота дала уявлення про структуру континентальної кори на основі вивчення сейсмічної рефракції на профілях та визначення складу земної кори залежно від глибини, на основі порівняння цих результатів з лабораторними вимірами швидкості в умовах високих тисків для широкого діапазону порід, типових для земної кори (Christensen and Mooney, 1995).

Особливу увагу завоювало застосування ГСЗ при визначенні мінерального складу земної кори. З плином часу уявлення про склад земної кори змінювалися, буріння надглибоких свердловин стало найвагомішим фактором у формуванні сучасних сейсмічних моделей. Розширився погляд на чинники, які впливають на сейсмічні хвилі, зокрема було помічено, що не тільки хімічний склад, а й внутрішня структура та фізичний стан породи мають значення (Шаров, 2012). Отримання несхожих результатів у різних авторів часто пов'язане з використанням невідповідних до природи зареєстрованих хвиль методів кількісної інтерпретації. Найбільш масштабні дослідження методом ГСЗ проводилися на територіях Українського, Балтійського (Фенноскандинавського) та Канадського щитів (Соллогуб, 1986; Трипольський та Шаров, 2004; Grad and Tripolsky, 1994; 1995; Соллогуб та ін., 1978).

Метою дослідження є побудова нового алгоритму просторового моделювання речовинного складу гірських порід, що узгоджується з результатами геофізичних, петрофізичних та геохімічних досліджень. В основі застосованого підходу лежить розвиток ідей геофізичної томографії, запропонованих С. Вижвою, Г. Продайвудою (Вижва та ін., 2010; 2013). Базовими геофізичними

методами, що використовуються для розв'язання комплексної задачі інверсії є глибинне сейсмічне зондування та гравіметрія (Продайвода та Гришук, 2007; Старостенко та Шванцара, 1994; Старостенко та ін., 1988). Також можуть бути залучені методи вивчення теплого поля Землі, магнітометрія та електрометрія (Продайвода та ін., 2012). Сумісність моделювання різних петрофізичних характеристик гірських порід досягається використанням універсальної багатокомпонентної анізотропної моделі середовища, що запропонована Г.Т. Продайвудою зі співавторами (Prodaivoda et al., 2000; Маслов та Продайвода, 1998; Продайвода та ін., 2003).

Геологічне середовище уявляється у вигляді стохастичної моделі суміші породотвірних мінералів у макроскопічному об'ємі, що набагато перевищує характерний розмір зерен мінералів. Для задач прогнозування складу земної кори такий розмір буде визначатися просторовою розрізненістю глибинного сейсмічного зондування (порядок перших кілометрів). Вважається, що окремі включення не дотикаються один до одного, їх форма описується двох або трьохвісним еліпсоїдом, а орієнтація задається за допомогою функції розподілу орієнтації. Сукупність включень однакового складу та форми вважається *компонентом* моделі. За рівномірного розподілу включень по об'єму комірки, що моделюється, можна використовувати статистичне усереднення за компонентами. Розмір об'єму комірки, для якої здійснюється осереднення властивостей середовища, має набагато перевищувати характерні розміри структурних елементів. Слід зауважити, що автори у цьому дослідженні не оперують розмірами елементів і, таким чином, у задачі сейсмоакустики обмежуються лише кінематичними параметрами.

На відміну від методів інверсії, що дозволяють отримати один із незліченної кількості розв'язків оберненої задачі (Нолета, 1990; Mahdavi-Amiri and Bartels, 1989; Lines et al., 1988; Банди, 1988), автори у даному дослідженні притримуються стохастичного підходу (Банди, 1988; Евтушенко та ін., 2009), що дозволяє отримати всю множину розв'язків, які не суперечать спостереженим даним у межах визначеного довірчого інтервалу. Вибір остаточного розв'язку здійснюється за критеріями найбільшої імовірності. Такий підхід дозволяє оцінити довірчі межі отриманих результатів. Стохастичне моделювання для задач глибинного сейсмічного зондування

і визначення потенційного речовинного складу було здійснено при інтерпретації результатів глибинних досліджень у Фенноскандії (*Silvennoinen et al., 2007*).

Як вхідні параметри моделі використовуються розподіли ймовірності величин, що моделюються: у першу чергу, об'ємні концентрації породотвірних мінералів та пустотного простору; у другу – параметри термонапруженого стану середовища – тиск і температура. Визначення розподілів ймовірності здійснюється шляхом статистичної обробки результатів геологічних та геохімічних досліджень для речовинного складу та введенням довірчих інтервалів для результатів геофізичних досліджень. Це дає головну перевагу відносно класичних методів інверсії з оптимізацією – уникнення можливості отримання геологічно беззмисливих розв'язків. Алгоритм не накладає жодних обмежень на характер розподілу величин. При моделюванні можуть бути використані одномодальні гаусівський або логнормальний розподіли, трикутні або прямокутні розподіли, полімодальні розподіли тощо.

Алгоритм моделювання. Узагальнений алгоритм моделювання базується на генерації великої кількості реалізацій вектору мінералогічного складу в межах кожної комірки моделі $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}_k$, де c_i – об'ємні концентрації компонентів моделі; k – індекс комірки моделі; n – кількість компонентів моделі. Генерація значень концентрацій здійснюється у межах $[0, 1]$ методом Монте-Карло згідно з неперервними розподілами ймовірності. Зважаючи на обмеження $\sum_1^n c_i = 1$, один із компонентів визначається як $c_n = 1 - \sum_1^{n-1} c_i$. Для кожної згенерованої реалізації розв'язується пряма задача сейсмоакустики, що дозволяє визначити модуль об'ємного стискання, модуль зсуву, густину, фазові швидкості повздовжньої та поперечної хвилі. Ці параметри додають до вектора реалізації $\{c_1, c_2, \dots, c_n, K_k, G_k, \rho_k, V_{Pk}, V_{Sk}\}_k$. Залежно від наявних даних здійснюється порівняння розрахованих швидкостей пружних хвиль зі спостереженими за одним із критеріїв найменших квадратів:

$$\varepsilon_P \leq (V_P^{\text{спост.}} - V_P^{\text{розрах.}})^2 \quad (1)$$

або

$$\varepsilon_{PS} \leq w_1 (V_P^{\text{спост.}} - V_P^{\text{розрах.}})^2 + w_2 (V_S^{\text{спост.}} - V_S^{\text{розрах.}})^2, \quad (2)$$

де w_1, w_2 – деякі вагові коефіцієнти; ε – нев'язка даних.

Вектори, що задовольняють істинність обраного критерію, формують списки "коректних розв'язків" для кожної комірки моделі. Довжина списків може варіюватися від комірки до комірки. На наступному етапі моделювання для розв'язання прямої задачі гравіметрії обирають випадковим чином – один вектор із списку "коректних розв'язків" для кожної комірки моделі. Ця матриця розмірністю $(n+5, M)$, де M – кількість комірок моделі, використовується для розрахунку аномалії сили тяжіння на векторі точок спостереження гравітаційного поля. Реалізації, що задовольняють критерій:

$$\varepsilon_g \leq \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (\Delta g_{a_q}^{\text{спост.}} - \Delta g_{a_q}^{\text{розрах.}})^2, \quad (3)$$

де Q – кількість точок спостереження гравітаційного поля, формують множину коректних розв'язків, що узгоджені одночасно з даними глибинного сейсмічного зондування та гравіметрії. Алгоритм може бути розширений за подібною ж логікою для використання теплового поля Землі, даних магнітометрії, електрометрії тощо. Кожен наступний метод має призводити до скорочення списків "коректних реалізацій" у комірках i , відповідно, звукувати область можливих розв'язків оберненої задачі для комплексу геофізичних методів (рис. 1.).

Остаточний результат моделювання може бути представлений або у вигляді розподілу (гістограми) концентрацій мінералів у кожній комірці, або для кожного

компоненту в кожній комірці визначається середнє значення (медіана, мода) та довірчі межі (середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт варіації тощо).

Узагальнена схема моделювання складається із блоків формування ймовірнісних характеристик вхідних даних, розв'язання прямих задач геофізики та відбору множини математично коректних розв'язків. Найголовнішу роль у побудові коректних моделей середовища відіграє вибір та обґрунтування математичної моделі розрахунку петрофізичних параметрів геологічного середовища.

Як розрахункові алгоритми для задач сейсмоакустики, термометрії, магнітометрії та електрометрії використовується метод умовних моментних функцій, реалізація якого неодноразово здійснена Г.Т. Продайвода з співавторами (*Продайвода та ін., 2012*).

Алгоритм, що пропонується у даному дослідженні, спрямований на вирішення проблеми прогнозування речовинного складу за даними глибинних досліджень (глибинне сейсмічне зондування, глибинна термометрія та електрометрія). Специфіка мережі спостережень цих методів (переважно профільні або точкові вимірювання) не дозволяє певнено фіксувати анізотропію параметрів, що вивчаються (фазові швидкості об'ємних пружних хвиль, теплопровідність, електропровідність тощо). Тому в програмних засобах авторами реалізовано алгоритми, засновані на ізотропній моделі середовища, наближеній до зернистої – форма включень вважається ізометричною, розподіл орієнтації кристалографічних осей мінералів рівноімовірний за усіма напрямками, що за великої кількості елементів дає статистично усереднене значення параметрів. Однак за потреби ядро алгоритмів розв'язання прямих задач геофізики може бути заміщене на інше, що використовує анізотропну модель, без значних затрат на зміну загального алгоритму моделювання.

Пряма задача сейсмоакустики. Розрахунок фазових швидкостей пружних хвиль здійснюється у декілька етапів. Вважається, що геологічне середовище перебуває в умовах дії всебічного стискання та температури, які можна вважати постійними у межах комірки моделювання. На першому етапі здійснюється розрахунок модулів об'ємного стискання, зсуву, коефіцієнта лінійного розширення у заданих умовах тиску та температури для кожного компоненту моделі за схемою:

$$X(P, T) = X_0 + P \left(\frac{\partial X}{\partial P} \right)_{T=\text{const}} + T \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_{P=\text{const}}, \quad (4)$$

де X – модуль об'ємного стискання K або модуль зсуву G , або коефіцієнт лінійного розширення α , параметр з індексом нуль означає значення параметра в лабораторних умовах; P – тиск; T – температура. Після цього визначається скориговане значення густини:

$$\rho(P, T) = \rho_0 \left(1 + \frac{P}{K(P, T)} - 3\alpha(P, T)T \right), \quad (5)$$

де ρ_0 – густина мінералу в лабораторних умовах.

База даних петрофізичних параметрів мінералів та їх похідних за тиском та температурою формується за результатами лабораторних досліджень (*Janik et al., 2007; Stixrude and Lithgow-Bertelloni, 2005; Anderson et al., 1992*).

На другому етапі здійснюється статистичне усереднення пружних модулів об'ємного стискання K та зсуву G для макроскопічного об'єму середовища за методом умовних моментних функцій з розрахунковою схемою Морі-Танакі. Програмно авторами повторно реалізований алгоритм, опублікований у (*Продайвода та ін., 2003*). За необхідності введення компоненти, що відповідає за пустотний простір (пружні характеристики відповідають властивостям флюїду – повітря, вода, газ тощо), проводиться повторне статистичне усереднення. При цьому отримані на попередньому етапі пружні модулі вважаються параметрами однорідної матриці, а пустоти можуть мати різну форму, що задається еліпсоїдом обертання.

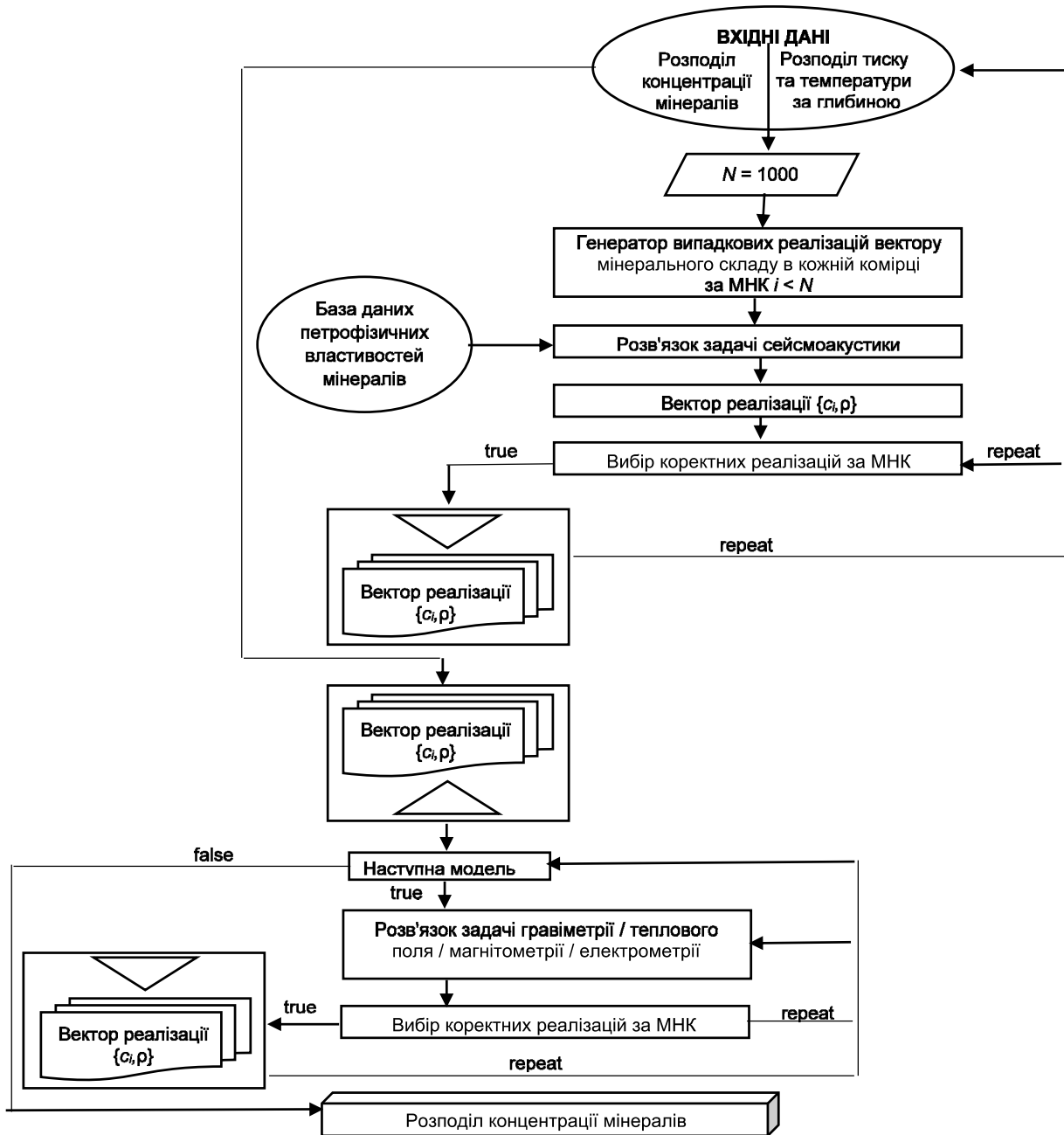


Рис. 1. Блок-схема алгоритму інтегрованого стохастичного моделювання речовинного складу геологічного середовища для комплексу геофізичних методів

Осереднення густини відбувається пропорційно до об'ємних концентрацій компонентів c_i :

$$\rho^* = \sum_{i=1}^N \rho_i(P, T) c_i \quad (6)$$

де N – кількість компонент моделі у даній комірці.

Фазові швидкості повздовжньої V_P та поперечної V_S пружних хвиль визначаються як

$$V_P = \sqrt{\frac{K^* + 4/3 G^*}{\rho^*}} \quad (7)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G^*}{\rho^*}} \quad (8)$$

Пряма задача гравіметрії. Для розрахунку аномального гравітаційного поля у заданих точках середовища (x_k, y_k, z_k) реалізовані формули розрахунку гравітаційного потенціалу точки (сфери заданого радіуса), кубу (з гранями орієнтованими: 1) горизонтально у площині профілю; 2) перпендикулярно до профілю та 3) вертикально), нескінченного горизонтального циліндра, паралелепіпеда та

нескінченного паралелепіпеда з довгими вісями, орієнтованими горизонтально перпендикулярно до площини профілю (Голіздра, 1977; Маловичко и Костицын, 1992; Миронов, 1980; Старостенко, 1978). Для кожної комірки визначається поточне значення густини, як частина рішення задачі сейсмоакустики (6) та значення нормальної густини ρ_n , яке встановлюється константою або визначається із лінійної залежності від глибини:

$$\rho_n = \rho_n^0 \left(1 + \frac{\partial \rho_n}{\partial z}\right) \quad (9)$$

де ρ_n^0 – нормальна густина на поверхні геоїда.

Сумарний розв'язок задачі для заданої точки поверхні спостереження можна представити у вигляді

$$\Delta g_a^k = \sum_{j=1}^M (\rho_j^* - \rho_n^j) \cdot F_{jk}^{CORE}(G, V, x_k, y_k, z_k, \xi_j, \eta_j, \zeta_j) \quad (10)$$

де M – загальна кількість комірок моделі; G – гравітаційна стала; V – об'єм комірки; k – індекс поточної точки вимірювання поля сили тяжіння; (ξ_j, η_j, ζ_j) – координати

центру ваги j комірки моделі; F_{jk}^{CORE} – постійна частина розрахункових формул гравітаційного потенціалу, що залежить від координат точок та гравітаційної сталої.

Геометрія моделі. Для задачі сейсмоакустики значення швидкостей визначаються поточною. При цьому відстань між сусідніми точками має задовольняти умову значного перевищення характерних розмірів структурних елементів середовища (зерен мінералів та мікротріщин). Для суміщення із задачами потенціальних полів вважається, що двовимірна модель складається із прямокутних паралелепіпедів з гранями, що орієнтовані горизонтально та вертикально. Швидкість визначається для геометричного центру комірки та екстраполюється на всю комірку. У найбільш простому варіанті реалізується мережа квадратних у площині профілю комірок, розташованих з рівним кроком як по вертикалі, так і по латералі. Контроль відсутності пустих інтервалів у моделі покладається на користувача. Для задач гравіметрії та магнітометрії розмір комірки у напрямку перпендикулярно площині профілю регулюється користувачем.

Описаний алгоритм є частиною нового інтерпретаційного пакету даних глибинних досліджень земної кори, що розробляється на кафедрах геоінформатики та геофізики ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Висновки та дискусія. Запропонований алгоритм має такі переваги щодо ітераційних методів інверсії з оптимізацією вхідних параметрів:

1) усі отримані розв'язки мають геологічний зміст, що обмежується розподілами ймовірності концентрацій породотвірних мінералів;

2) відсутні проблеми оптимізації з обмеженнями, пов'язані з визначеністю вхідних параметрів на короткому інтервалі $[0, 1]$;

3) розв'язок не залежить від вибору моделі початкового наближення;

4) результатом моделювання є статистично значуща сукупність розв'язків, що дає змогу обґрунтовано обрати найбільш імовірне значення та визначити довірчі межі розв'язку.

Реалізований програмний комплекс буде використано для моделювання речовинного складу земної кори в межах Українського щита (у першу чергу Кіровоградського блоку) та Фенноскандії.

Список використаних джерел

- Банди, Б. (1988). Методи оптимізації. М.: Радио и связь.
- Вижва, С., Продайвода, Г., Віршило, І. (2010). Методологічні і теоретичні принципи сейсмогравітаційної томографії. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 48, 29–33.
- Вижва, С., Продайвода, Г., Віршило, І., Козіонова, О. (2013). Проблеми інформаційного забезпечення інтерпретаційних технологій геофізичної томографії. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 62, 57–62.
- Гаврилов, В.П. (2005). Геотектоника. *Нефть и газ*, 368, 30–66.
- Голіздра, Г.Я. (1977). Основные методы решения прямой задачи гравиразведки на ЭВМ. *Обзор ОНТИ ВИЭМС. Сер. Регион., равед. и промышл. геофиз.*, 99.
- Евтушенко, Ю. Г., Малков, В. У., Станевичюс, А. А. (2009). Параллельный поиск глобального экстремума функции многих переменных. *Вычисл. матем. и мат. физ.*, 49, 2, 255–269.
- Косминская, И.П., Давыдова, Н.И. (1980). Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. *Сейсмические модели*. М.: Наука, 11–15.
- Маловичко, А.К., Костицын, В.И. (1992). Гравиразведка, М.: Недра.
- Маслов, Б.П., Продайвода, Г.Т. (1998). Дисперсия и рассеяние упругих волн в трещиноватой геологической среде. *Геофизический журнал*, 20 (2), 47–55.
- Миронов, В.С. (1980). Курс гравиразведки. Л.: Недра.
- Нолет, Г. (Ред.) (1990). Сейсмическая томография. М.: Мир.
- Продайвода, Г., Зінченко, О., Козіонова, О. (2005). Методологічні принципи формування бази даних головних літотипів для визначення речовинного складу земної кори північно-західного району Українського щита сейсмогравітаційним методом. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 34, 11–18.

- Продайвода, Г. Т., Вижва, С.А., Віршило, І.В. (2012). Математичне моделювання геофізичних параметрів. К.: ВПЦ "Київ. ун-г".
- Продайвода, Г. Т., Гришук, П. І. (2007). Гравіметричний метод геокартування структурно-речовинних комплексів Українського щита. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 41, 7–10.
- Продайвода, Г.Т., Маслов, Б.П., Продайвода, Т.Г. (2003). Сейсмо-нералогическая модель верхней мантии. *Физика Земли*, 2, 3–14.
- Ризниченко, О.Ю. (2016). ГСЗ: От глубинной сейсморазведки к сейсмологии контролируемых источников. К столетию со дня рождения И.П. Косминской. *Геофизические исследования*, 17 (2), 77–82.
- Соллогуб, В. Б. (1986). Литосфера Украины. Киев: Наук. думка.
- Соллогуб, В. Б., Чекунов, А. В., Трипольский, А. А., Бабинец, В. А. (1978). Результаты исследования глубинного строения Украинского щита. Строение коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы. К.: Наук. думка, 136–147.
- Старостенко, В.И. (1978). Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. К.: Наукова думка.
- Старостенко, В.И., Костюкевич, А.С., Козленко, В.Г. (1988). Комплексная интерпретация сейсмометрии и гравиметрии. Принципы и методика. *Изв. АН СССР, Физика Земли*, 4, 33–49.
- Старостенко, В.И., Шванцара, Я. (1994). Сейсмогравитационное моделирование при изучении литосферы. К.: Наук. думка.
- Трипольский, А.А., Шаров, Н.В. (2004). Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск. Карельский научный центр Российской академии наук, Институт геологии. Национальная академия наук Украины, Институт геофизики.
- Тулина, Ю.В., Бурмин, В.Ю., Шемелева, И.Б. (2011). К проблеме неоднозначности интерпретации наблюдаемых данных глубинного сейсмического зондирования. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия.
- Шаров, Н. В. (2012). Сопоставление геофизических разрезов земной коры с результатами бурения глубоких скважин на Фенноскандинавском щите. Институт геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, Россия.
- Шарый, С.П. (2008). Рандомизированные алгоритмы в интервальной глобальной оптимизации. *Сибир. журн. вычисл. матем.*, 11, 4, 457–474.
- Anderson, O., Isaak, D., Oda, H. (1992). High-Temperature Elastic-Constant Data on Minerals Relevant to Geophysics. *Reviews of Geophysics*, 30 (1), 57–90. <https://doi.org/10.1029/91RG02810>
- Christensen, N. I., Mooney, W. D. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research*, 100(B6), 9761. doi:10.1029/95JB00259
- FENNIA Working Group. (1998). P- and S-velocity structure of the Baltic Shield beneath the FENNIA profile in southern Finland. *Report*. Univ. of Helsinki.
- Grad, M., Luosto, U. (1994). Seismic velocities and Q-factors in the uppermost crust beneath the SVEKA profile in Finland. *Tectonophysics*, 230, 1-18. doi:10.1016/0040-1951(94)90144m9.
- Grad, M., Tripolsky, A. A. (1994). Structure of the Ukrainian shield. P. 3: Seismic and petrological models of the Ukrainian shield. *Acta Geophysica Polonica*, 42, 1, 23–44.
- Grad, M., Tripolsky, A. A. (1995). Crustal structure from P and S seismic waves and petrological models of the Ukrainian shield. *Tectonophysics*, 250, 89–112.
- Janik, T., Kozlovskaya, E., Heikkinen, P., Yliniemi, J., Silvennoinen, H. (2009). Evidence for preservation of crustal root beneath the Proterozoic Lapland-Kola orogen (northern Fennoscandian shield) derived from P and S wave velocity models of POLAR and HUKKA wide-angle reflection and refraction profiles and FIRE4 reflection transect. *Journal of Geophysical Research*, 114, B06308. doi:10.1029/2008JB005689
- Janik, T., Kozlovskaya, E., Yliniemi, J. (2007). Crust-mantle boundary in the central Fennoscandian shield: Constraints from wide-angle P and S wave velocity models and new results of reflection profiling in Finland. *Journal of Geophysical Research*, 112(B4), 1-28. <http://doi.org/10.1029/2006JB004681>
- Kozlovskaya, E., Elo, S., Hjelt, S.-E., Yliniemi, J., Pirttijarvi, M. and SVEKALAPKO STWG. (2004). 3D density model of the crust of southern and central Finland obtained from joint interpretation of SVEKALAPKO crustal P-wave velocity model and gravity data. *Geophysical Journal International*, 158, 827–848.
- Lines, L.R., Schultz, A.K., Treitel, S. (1988). Cooperative inversion of geophysical data. *Geophysics*, 53, 1, 8–20.
- Luosto, U. et al. (1989). The crustal structure along the POLAR Profile from seismic refraction investigation. *Tectonophysics*, 162, 51–85. doi:10.1016/0040-1951(89)90356-9
- Mahdavi-Amiri, N., Bartels, R.H. (1989). Constrained Nonlinear Least Squares: An Exact Penalty Approach with Projected Structured Quasi-Newton Updates. *ACM Trans. Mathem. Software*, 15, 3, 220–242.
- Pradaivoda, G. T., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V., Vyzhva, S. A. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 36 (5), 394-405.
- Silvennoinen, H., Kozlovskaya, E. (2007). 3D structure and physical properties of the Kuhmo Greenstone Belt (eastern Finland): Constraints from gravity modeling and seismic data and implications for the tectonic setting. *Journal of Geodynamics*, 43 (3), 358–373. <http://doi.org/10.1016/j.jog.2006.09.018>
- Silvennoinen, H., Kozlovskaya, E. (2010). Upper Crustal Velocity and Density Models along FIRE4 Profile. *Geophysics*, 46 (1–2), 21–46.
- Stixrude, L., Lithgow-Bertelloni, C. (2005). Thermodynamics of mantle minerals I. Physical properties. *Geophysical Journal International*, 162 (2), 610–632.

References

- Anderson, O., Isaak, D., Oda, H. (1992). High-Temperature Elastic-Constant Data on Minerals Relevant to Geophysics. *Reviews of Geophysics*, 30 (1), 57-90. <https://doi.org/10.1029/91RG02810>
- Bandy, B. (1988). Metody optimizatsii. M.: Radio i svyaz. [in Russian]
- Christensen, N. I., Mooney, W. D. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research*, 100(B6), 9761. doi:10.1029/95JB00259
- Evtushenko, U.G., Malkov, V.U., Stanevichus, A.A. (2009). Parallelniy poise globalnogo ekstremuma funktsii mnogih peremennyh. *Vychisl. matem. i mat. fis.*, 49, 2, 255-269. [in Russian]
- FENNIA Working Group. (1998). P- and S-velocity structure of the Baltic Shield beneath the FENNIA profile in southern Finland. *Report. Univ. of Helsinki*.
- Gavrilov, V.P., (2005). Geotektonika. *Neft i gas*, 368, 30-66. [in Russian]
- Golizdra, G.Ya. (1977). Osnovnye metody resheniya pryamoy zadachi gravirazvedki na EVM. *Obzor ONTI VIEMS. Ser. Region., raved. I promysl. geofiz.*, 99. [in Russian]
- Grad, M., Tripolsky, A. A. (1994). Structure of the Ukrainian shield. P. 3: Seismic and petrological models of the Ukrainian shield. *Acta Geophysica Polonica*, 42, 1, 23-44.
- Grad M., Tripolsky, A. A. (1995). Crustal structure from P and S seismic waves and petrological models of the Ukrainian shield. *Tectonophysics*, 250, 89-112.
- Grad, M., Luosto, U. (1994). Seismic velocities and Q-factors in the uppermost crust beneath the SVEKA profile in Finland. *Tectonophysics*, 230, 1-18. doi:10.1016/0040-1951(94)90144-9.
- Janik, T., E. Kozlovskaya, P. Heikkinen, J. Yliniemi, and H. Silvennoinen. (2009) Evidence for preservation of crustal root beneath the Proterozoic Lapland-Kola orogen (northern Fennoscandian shield) derived from P and S wave velocity models of POLAR and HUKKA wide-angle reflection and refraction profiles and FIRE4 reflection transect. *J. Geophys. Res.* 114, B06308, doi:10.1029/2008JB005689
- Janik, T., Kozlovskaya, E., Yliniemi, J. (2007). Crust-mantle boundary in the central Fennoscandian shield: Constraints from wide-angle P and S wave velocity models and new results of reflection profiling in Finland. *Journal of Geophysical Research*, 112(B4), 1-28. <http://doi.org/10.1029/2006JB004681>
- Kosminskaya, I.P., Davydova, N.I. (1980). Seismicheskie modeli litosfery I osnovnykh geostruktur territorii SSSR. Seismicheskie modeli. M.: Nauka, 11-15. [in Russian]
- Kozlovskaya, E., Elo, S., Hjelt, S.-E., Yliniemi, J., Piittijarvi, M. and SVEKALAPKO STWG. (2004). 3D density model of the crust of southern and central Finland obtained from joint interpretation of SVEKALAPKO crustal P-wave velocity model and gravity data. *Geophysical Journal International*, 158, 827-848.
- Lines, L.R., Schultz, A.K., Treitel, S. (1988). Cooperative inversion of geophysical data. *Geophysics*, 53, 1, 8-20.
- Luosto, U. et al. (1989). The crustal structure along the POLAR Profile from seismic refraction investigation. *Tectonophysics*, 162, 51-85. doi:10.1016/0040-1951(89)90356-9
- Mahdavi-Amiri, N., Bartels, R.H. (1989). Constrained nonlinear least squares: An Exact Penalte Approach with Projected Structured Quasi-Newton Updates. *ACM Trans. Mathem. Software*, 15, 3, 220-242.
- Malovichko, A.K., Kosticyn, V.I. (1992). Gravirazvedka. M.: Nedra. [in Russian]
- Maslov, B.P., Prodayvoda, G.T. (1998). Dispersiya I rasseyaniye uprugih voln v treschinovatoj geologicheskoy srede. *Geofizicheskiy zhurnal*, 20, 2, 47-55. [in Russian]
- Mironov, V.S. (1980). Kurs gravirazvedki. L.: Nedra. [in Russian]
- Noleta, G. (Edc.). (1990). Seismicheskaya tomografiya. M.: Mir. [in Russian]
- Prodayvoda, H. T., Hryshchuk, P. I. (2007). Hravimetrychniy metod heokartuvannia strukturno-rechovnykh kompleksiv Ukrainskoho shchytia. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 41, 7-10. [in Ukrainian]
- Prodayvoda, G.T., Maslov, B.P., Prodayvoda, T.G. (2003). Seismomineralogical model of the continental upper mantle. *Fizika Zemli*, 2, 3-14. [in Russian]
- Prodayvoda, G. T., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V., Vyzhva, S. A. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 36(5), 394-405. [in Russian]
- Prodayvoda, G., Zinchenko, O., Kozionova, O. (2005). Methodological principle of formation of main lithotypes database for determination of Earth crust composition of north-west region of Ukrainian shield by seismogravitational method. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 34, 11-18. [in Ukrainian]
- Prodayvoda, G.T., Vyzhva, S.A., Virshylo, I.V. (2012). Matematychnye modelyuvannya geofizichnykh parametriv. Kyiv: VTS "Kyivskiy universytet". [in Ukrainian].
- Riznichenko, O.Yu. (2016). GSZ: Ot glubinnoy seysmorazvedki k seysmologii kontroliremyih istochnikov. K stoletiyu so dnya rozhdeniya I.P. Kosminskoy. *Geofizicheskie issledovaniya*, 17, 2, 77-82. [in Russian]
- Sharov, N. V. (2012) Comparison of the geophysical sections of the earth crust with the results of deep drilling in the Fennoscandian shield. *Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. [in Russian]
- Shary, S.P. (2008). Randomized algorithms in interval global optimization. *Siberian J. Num. Math.*, 11, 4, 457-474. [in Russian]
- Silvennoinen, H., Kozlovskaya, E. (2007). 3D structure and physical properties of the Kuhmo Greenstone Belt (eastern Finland): Constraints from gravity modelling and seismic data and implications for the tectonic setting. *Journal of Geodynamics*, 43(3), 358-373. <http://doi.org/10.1016/j.jog.2006.09.018>
- Silvennoinen, H., Kozlovskaya, E. (2010). Upper crustal velocity and density models along FIRE4 profile. *Geophysics*, 46(1-2), 21-46.
- Sollogub, V. B. (1986). Litosfera Ukrainyi. Kiev: Nauk. dumka. [in Russian]
- Sollogub, V. B., Chekunov, A. V., Tripolskiy, A. A., Babinets, V. A. (1978). Rezultaty issledovaniya glubinnogo stroeniya Ukrainskogo shchytia. Stroyeniye kory i verkhney mantii Tsentral'noy i Vostochnoy Yevropy. Kiev: Nauk. dumka, 136-147. [in Russian]
- Starostenko, V.I. (1978). Ustoychivyye chislennyye metody v zadachah gravimetrii. K.: Nauk. dumka. [in Russian]
- Starostenko, V.I., Kostyukevich, A.S., Kozlenko, V.G. (1988). Kompleksnaya interpretatsiya seysmometrii i gravimetrii. Printsipy i metodika. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 4, 33-49. [in Russian]
- Starostenko, V.I., Shvantsara, Ya. (1994). Seysmogravitatsionnoe modelirovaniye pri izuchenii litosfery. K.: Nauk. dumka. [in Russian]
- Stixrude, L., Lithgow-Bertelloni, C. (2005). Thermodynamics of mantle minerals - I. Physical properties. *Geophysical Journal International*, 162 (2), 610-632.
- Tripolsky, A. A., Sharov, N. V. (2004). Structure of the precambrian shields of the northern hemisphere of the Earth lithosphere by seismic data. Petrozavodsk. Karelian research centre Russian academy of sciences, Institute of Geology. National academy of sciences of Ukraine, Institute of Geophysics. [in Russian]
- Tulina, Yu.V., Burmin, V.Yu., Shemeleva, I.B. (2011). To ambiguity problem of interpretation of deep seismic sounding data. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. [in Russian]
- Vyzhva, S., Prodayvoda, G., Virshylo, I., Kozionova, O. (2013). The problems of information support of geophysical tomography interpretive technologies. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 62, 57-62. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Prodayvoda, G., Virshylo, I. (2010). Metodolohichni i teoretychni printsypy seysmohravitatsiyanoi tomohrafiyi. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 48, 29-33. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.12.18

I. Virshylo, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: ivirshylo@gmail.com
I. Pap, PhD student,
E-mail: papiryna@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

INTEGRATED STOCHASTIC MODELING OF PETROPHYSICAL PARAMETERS FOR THE ESTIMATION OF MINERALOGICAL COMPOSITION OF THE EARTH CRUST

The construction of a new algorithm for spatial modeling of the composition of rocks, which is consistent with the results of geophysical, petrophysical and geochemical studies, is considered. The probability distributions of the quantities simulated – volume concentrations of rock-forming minerals and voids and the parameters of the thermally stressed state of the medium – pressure and temperature are used as input parameters of the model. The determination of probability distributions is carried out by statistical processing of the results of geological and geochemical studies for the composition and the introduction of confidence intervals for the results of geophysical studies. The method of conditional moment functions for the problem of seismic acoustics, thermometry, magnetometry and electrometry is used as calculation algorithms. The algorithm is based on a multicomponent matrix model of a medium with ellipsoidal inclusions and has no restrictions on the concentration of components. The algorithm makes it possible to take into account arbitrary symmetry of the medium. The result of the simulation is a statistically significant set of decisions that have a geological meaning and are limited to the probability distribution of the concentrations of rock-forming minerals.

Keywords: deep seismic sounding, seismic and mineralogical models, global optimization methods, stochastic methods, direct problem of seismic acoustics, Monte Carlo method, method of conditional moment functions.

И. Виршило, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: ivirshylo@gmail.com

И. Пап, асп.,

E-mail: papiryna@gmail.com

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ИНТЕГРИРОВАННОЕ СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗЕМНОЙ КОРЫ

Рассматривается построение нового алгоритма пространственного моделирования вещественного состава горных пород, который согласуется с результатами геофизических, петрофизических и геохимических исследований. В качестве входных параметров модели используются распределения вероятности величин, которые моделируются – объемные концентрации породообразующих минералов и пустотного пространства, и параметры термонапряженного состояния среды – давление и температура. Определение распределений вероятности осуществляется путем статистической обработки результатов геологических и геохимических исследований для вещественного состава и введением доверительных интервалов для результатов геофизических исследований. В качестве расчетных алгоритмов для задач сейсмоакустики, термометрии, магнитометрии и электрометрии используется метод условных моментных функции. В основе алгоритма лежит многокомпонентная матричная модель среды с эллипсоидальными включениями, которая не имеет ограничений на концентрацию компонентов и позволяет учитывать произвольную симметрию среды. Результатом моделирования является статистически значимая совокупность решений, которые имеют геологический смысл и ограничиваются распределением вероятности концентраций породообразующих минералов.

Ключевые слова: глубинное сейсмическое зондирование, сейсмо-минералогические модели, методы глобальной оптимизации, стохастические методы, прямая задача сейсмоакустики, метод Монте-Карло, метод условных моментных функции.