

НОВЫЕ МЕТОДЫ ГЕОИНФОРМАТИКИ ДЛЯ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СРЕДАХ

О.А. Хачай¹, О.Ю. Хачай², А.Ю. Хачай²

¹*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, ул. Амундсена, 100, Екатеринбург 620016, Российская Федерация, e-mail:olgakhachay@yandex.ru*

²*Уральский Федеральный университет, Институт математики и компьютерных наук, ул. Мира, 19, Екатеринбург 620002, Российская Федерация, e-mail:khachay@yandex.ru, e-mail:andrey.khachay@gmail.com*

Для решения задач геолого-геофизического картирования в настоящее время широко используется модель слоисто-блоковой среды с включениями неиерархического строения, в рамках которой созданы аппаратно-методические комплексы изучения трехмерно неоднородных сред с соответствующей теорией интерпретации геофизических данных. Крупным результатом исследований прошлого столетия стало заключение о фундаментальной роли блочно-иерархического строения горных пород и массивов для объяснения существования широкой гаммы нелинейных геомеханических эффектов и возникновения сложных самоорганизующихся геосистем при анализе формирования крупных и суперкрупных месторождений. Иерархическая структура характерна для многих систем, особенно для литосферы Земли, где по данным геофизических исследований выделено более 30 иерархических уровней от тектонических плит протяженностью в тысячи километров до отдельных минеральных зерен миллиметрового размера. Таким образом, земная кора представляет собой сплошную среду, включающую в себя дискретную систему блоков и, как любой синергетический дискретный ансамбль, обладает свойствами иерархичности и самоподобия. Это необходимо учитывать при создании новых комплексных систем геофизического изучения литосферы Земли. Приведено построение итерационных алгоритмов 2D моделирования для дифракции звука и линейно поляризованной поперечной упругой волны на включении с иерархической упругой структурой, расположенной в J -м слое N -слойной упругой среды. Рассмотрен случай, когда плотность включения каждого ранга отличается от плотности вмещающей среды, а упругие параметры совпадают с упругими параметрами вмещающего слоя. Применен метод интегральных и интегро-дифференциальных уравнений для пространственно-частотного представления распределения волновых полей. Из построенной теории следует, что при комплексировании сейсмических и гравитационных полей необходимы данные, которые получены в рамках систем наблюдения, настроенных на исследование иерархической структуры среды. Использование значений плотности, рассчитанной из корреляционной зависимости скорости распространения продольной волны, определенной из кинематической интерпретации сейсмических данных, от плотности для построения плотностной модели по гравитационным данным, может привести к несоответствию такой модели вещественному составу изучаемой геологической среды. Эти результаты являются основой для построения новых систем картирования геологических систем, что особенно востребовано при картировании нефтегазовых месторождений и прогнозе их эффективной отдачи.

Ключевые слова: иерархическая среда, гравитационное поле, сейсмическое поле, итерационный алгоритм моделирования.

Введение. Последние десятилетия характеризуются активным развитием наук о Земле. Согласно материалам, изложенным в работе академика А.Н. Дмитриевского “Геофизика XX века” [1], следует признать следующее:

- геофизические поля являются индикаторами процессов, протекающих в литосфере; геофизические параметры, регистрируемые дистанционно, могут иметь функциональную или тесную корреляционную связь с вещественно-структурными характеристиками геологической среды (на макро-, мезо- и микроуровнях);

- анализ пространственно-временного и энергетического распределения геофизического поля мо-

жет дать информацию о пространственно-временном распределении свойств геологической среды.

Практические задачи геофизики XX в. явились мощным стимулом развития теоретической и экспериментальной физики тонкослоистых, пористых и трещиноватых сред. В результате были получены новые классы математических моделей флюидонасыщенных неоднородных сред, изучены эффекты анизотропии геологической среды, обнаружены различные физические и физико-химические эффекты, возникающие на границах твердый скелет–жидкость. Геофизика впервые поставила вопрос о возможности построения физико-геологических и математических моделей геологических объек-

тов и процессов. Прикладная геофизика XX в. реализовала возможность изучения одних и тех же геологических объектов на микроуровне (ядерная геофизика), мезоуровне (электрические, тепловые, магнитные, гравитационные, акустические поля) и макроуровне (поля упругих волн и низкочастотные электромагнитные поля).

Геофизика позволила ответить на такие принципиальные для геолога вопросы:

- какова глубина залегания и геометрия (иногда морфология) исследуемого геобъекта;

- каков вещественно-структурный состав геобъекта;

- где и как расположены субвертикальные и субгоризонтальные неоднородности и прежде всего зоны макротрещиноватости;

- каковы условия фильтрации для флюидов-порозаполнителей;

- каковы термодинамические условия залегания искомого объекта.

Геофизика XXI в. – это понимание того, что Земля представляет собой саморазвивающуюся, самоподдерживающуюся геокибернетическую систему, в которой роль движущего механизма выполняют градиенты геофизических полей. Применение в геофизике принципов иерархичности, нелинейных эффектов, эффектов переизлучения геофизических полей позволит создать новую геофизику. В области методологии необходимо широко использовать эффекты взаимодействия и преобразования геофизических полей, широко внедрять комбинированные системы измерений при управляемом воздействии на среду (типа каротаж–воздействие–каротаж), реализовать недавно обнаруженные принципы организации геологического и геофизического пространства (квантованность, иерархичность). В области теории математического моделирования геофизических полей и систем интерпретации результатов наблюдений необходимо получить новые классы уравнений, описывающих распространение упругих и электромагнитных волн в неоднородных средах с учетом многообразных проявлений нелинейности геологической среды и необратимости геофизических процессов.

В работах [2–4] построены алгоритмы моделирования в электромагнитном случае для 3D неоднородности, в сейсмическом – для 2D неоднородности при произвольном типе источника возбуждения N -слоистой среды с иерархическим проводящим или упругим включением, расположенным в J -м слое. Построен итерационный алгоритм решения обратной задачи для 2D дифракции линейно поляризованной упругой поперечной волны для N -слоистой упругой среды с упругим аномально напряженным включением иерархического типа на основе уравнения теоретической обратной задачи [5].

Моделирование дифракции звука на двумерной аномально напряженной неоднородности иерархического типа, расположенной в N -слоистой упругой среде. В статье [3] описан алгоритм моделирования дифракции звука на двумерном упругом иерархическом включении, расположенном в J -м слое N -слоистой среды: $G_{Sp,j}(M, M^0)$ – функция источника сейсмического поля, краевая задача для которой сформулирована в статье [2]; $k_{1ji}^2 = \omega^2(\sigma_{ji}/\lambda_{ji})$ – волновое число для продольной волны, в приведенном выражении индекс ji обозначает свойства среды внутри неоднородности, индекс ja – вне неоднородности; λ – постоянная Ламэ; σ – плотность среды; ω – круговая частота; $\vec{u}_l = \text{grad } \varphi$ – вектор смещений; φ^0 – потенциал нормального сейсмического поля в слоистой среде при отсутствии неоднородности: $\varphi_{ji}^0 = \varphi_{ja}^0$.

Будем считать, что упругие параметры иерархического включения для всех рангов l и вмещающего слоя одинаковы, а плотность иерархического включения для всех рангов отличается от плотности вмещающей среды. Тогда систему уравнений [3] перепишем в виде

$$\begin{aligned} & \frac{(k_{1ji}^2 - k_{1j}^2)}{2\pi} \iint_{S_{cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{ji}} \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jil})}{\sigma_{ji} 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi(M^0), M^0 \in S_{Cl}, \\ & \frac{\sigma_{jil}(k_{1jil}^2 - k_{1j}^2)}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{S_{cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jil})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0), M^0 \notin S_{Cl}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $G_{Sp,j}(M, M^0)$ – функция источника сейсмического поля, совпадает с функцией [3]; $k_{1jil}^2 = \omega^2(\sigma_{jil}/\lambda_{jil})$, λ_{jil} – волновое число для продольной волны, в приведенном выражении индекс ji обозначает свойства среды внутри неоднородности, индекс ja – вне неоднородности, $l = 1 \dots L$ – номер иерархического уровня; φ_l^0 – потенциал нормального сейсмического поля в слоистой среде при отсутствии неоднородности предыдущего ранга: если $l = 2 \dots L$, $\varphi_l^0 = \varphi_{l-1}^0$; если $l = 1$, $\varphi_l^0 = \varphi^0$, что совпадает с соответствующим выражением в статье [3].

Если при переходе на следующий иерархический уровень ось двумерности не меняется, а изменяются только геометрии сечений вложенных структур, можно описать итерационный процесс моделирования сейсмического поля (случай формирования только продольной волны). Итерационный процесс относится к моделированию вектора смещений при переходе с предыдущего иерархического уровня на последующий. Внутри каждого иерархического уровня интегро-дифференциальное уравнение и интегро-дифференциальное представление вычисляются с помощью алгоритмов

(1). Если на некотором иерархическом уровне структура локальной неоднородности распадается на несколько неоднородностей, то двойной и контурный интегралы в выражениях (1) берутся по всем неоднородностям. В данном алгоритме рассмотрен случай, когда физические свойства неоднородностей одного и того же уровня одинаковы, различаются только границы областей.

Моделирование дифракции упругой поперечной волны на аномально напряженной неоднородности иерархического типа, расположенной в N -слойной упругой среде. Аналогично алгоритмам (1) выписывается такой же процесс для моделирования распространения упругой поперечной волны в N -слойной среде с двумерной иерархической структурой произвольной морфологии сечения с использованием интегральных соотношений, выписанных в статье [3]:

$$\begin{aligned} & \frac{(k_{2jil}^2 - k_{2j}^2)}{2\pi} \iint_{S_{Cl_l}} u_{xl}(M) G_{Ss,j}(M, M^0) d\tau_M + u_{x(l-1)}^0(M^0) = \\ & = u_{xl}(M^0), M^0 \in S_{Cl}, \\ & \frac{\mu_{jil}(k_{2jil}^2 - k_{2j}^2)}{\mu(M^0)2\pi} \iint_{S_{Cl_l}} u_{xl}(M) G_{Ss,j}(M, M^0) d\tau_M + u_{x(l-1)}^0(M^0) = \\ & = u_{xl}(M^0), M^0 \notin S_{Cl}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $G_{Ss,j}(M, M^0)$ – функция источника сейсмического поля рассматриваемой задачи, совпадает с функцией Грина, выписанной в работе [3] для соответствующей задачи; $k_{2jil}^2 = \omega^2(\sigma_{jil} / \mu_{jil})$, $\mu_{jil} = \mu_{ja}$ – волновое число для поперечной волны; μ – постоянная Ламэ; u_{xl} – составляющая вектора смещений, $l = 1 \dots L$ – номер иерархического уровня; u_{xl}^0 – составляющая вектора смещений сейсмического поля в слоистой среде при отсутствии неоднородности предыдущего ранга: если $l = 2 \dots L$, $u_{xl}^0 = u_{x(l-1)}$; $u_{xl}^0 = u_x^0$, если $l = 1$, что совпадает с соответствующим выражением для нормального поля в работе [3]. Следует отметить что структура уравнений (1) совпадает с общим случаем, когда отличаются не только плотностные параметры иерархической неоднородности от параметров вмещающей среды, но и упругие параметры на всех рангах от упругих параметров вмещающего слоя. Отличие этой задачи заключается

только в значениях волнового числа. Таким образом, более чувствителен к области плотностных неоднородностей в массиве отклик среды, связанный с поперечной волной, что следует учитывать при картировании сложноорганизованной геологической среды.

Заключение. Сопоставление выражений (1) и (2) привело к следующим выводам. При построении комплексной сейсмогравитационной модели без учета аномального влияния напряженно-деформированного состояния внутри включения анализ аномального акустического эффекта с использованием данных о распространении продольной волны показывает, что он более чувствителен и к форме включения по сравнению с акустическим эффектом о распространении поперечной волны. Однако из выражений (1), (2) следует, что во вмещающей среде ролью упругих параметров в сейсмической модели пренебрегать нельзя, при интерпретации они влияют на значения искомым аномальных плотностей. Если эти значения использовать при построении плотностной гравитационной модели, то они не будут отражать вещественный состав анализируемой среды.

1. *Дмитриевский А.Н.* Избранные труды. Т. 2. – М.: Наука, 2009. – 435 с.
2. *Хачай О.А.* О комплексировании сейсмических и электромагнитных активных методов для картирования и мониторинга состояния двумерных неоднородностей в N -слойной среде / А.Ю. Хачай // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2011. – № 2 (219). – С. 49–56.
3. *Хачай О.А.* Моделирование электромагнитного и сейсмического поля в иерархически неоднородных средах / А.Ю. Хачай // Вестник ЮУрГУ. Сер. Вычислительная математика и информатика. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 48–55.
4. *Хачай О.А.* Новые методы геоинформатики мониторинга волновых полей в иерархических средах / О.Ю. Хачай, А.Ю. Хачай // Геоинформатика. – 2015. – № 3. – С. 45–51.
5. *Хачай О.А.* Определение поверхности аномально напряженного включения в иерархической слоисто-блоковой среде по данным акустического мониторинга / О.Ю. Хачай, А.Ю. Хачай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 4. – С. 354–366.

Поступила в редакцию 16.05.2016 г.

НОВІ МЕТОДИ ГЕОІНФОРМАТИКИ ДЛЯ КОМПЛЕКСУВАННЯ СЕЙСМІЧНИХ І ГРАВІТАЦІЙНИХ ПОЛІВ В ІЄРАРХІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

О.О. Хачай¹, О.Ю. Хачай², А.Ю. Хачай²

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, вул. Амундсена, 100, Екатеринбург 620016, Российская Федерация, e-mail: olgakhachay@yandex.ru

²Уральский Федеральный университет, Институт математики та комп'ютерних наук, вул. Миру, 19, Екатеринбург 620002, Российская Федерация, e-mail: khachay@yandex.ru, andrey.khachay@gmail.com

Для вирішення завдань геолого-геофізичного картування нині широко використовують модель шарувато-блокового середовища з включеннями неієрархічної будови, в рамках якої створено апаратно-методичні

комплекси вивчення тривимірно-неоднорідних середовищ з відповідною теорією інтерпретації геофізичних даних. Значним результатом досліджень минулого століття став висновок про фундаментальну роль блочно-ієрархічної будови гірських порід і масивів для пояснення існування широкої гами нелінійних геомеханічних ефектів і виникнення складних геосистем, здатних до самоорганізації, під час аналізу формування значних і супервеликих родовищ. Ієрархічна структура характерна для багатьох систем, особливо для літосфери Землі, де було виділено за геофізичними дослідженнями більш як 30 ієрархічних рівнів від тектонічних плит завдовжки у тисячі кілометрів до окремих мінеральних зерен міліметрового розміру. Таким чином, земна кора є суцільним середовищем, що містить дискретну систему блоків та, як і будь-який синергетичний дискретний ансамбль, має властивості ієрархічності і самоподібності. Це необхідно враховувати при створенні нових комплексних систем геофізичного вивчення літосфери Землі. Наведено побудову ітераційного алгоритму 2D моделювання для дифракції звуку і лінійно поляризованої поперечної пружної хвилі на включенні з ієрархічною пружною структурою, розташованою в J -му шарі N -шарового пружного середовища. Розглянуто випадок, коли густина включення кожного рангу відрізняється від густини вмісного середовища, а пружні параметри збігаються з пружними параметрами вмісного шару. Використано метод інтегральних та інтегро-диференціальних рівнянь для просторово-частотного зображення розподілу хвильових полів. З побудованої теорії випливає, що під час комплексування сейсмічних і гравітаційних полів необхідні дані, які отримані в межах систем спостереження, налаштованих на дослідження ієрархічної структури середовища. Використання значень густини, обчисленої з кореляційної залежності швидкості поширення поздовжньої хвилі, яку визначено на підставі кінематичної інтерпретації сейсмічних даних, від густини для побудови густинної моделі за гравітаційними даними, може призвести до невідповідності такої моделі речовинному складу досліджуваного геологічного середовища. Ці результати є основою для побудови нових систем картування геологічних систем, що особливо затребувано для картування нафтогазових родовищ і прогнозу їх ефективної віддачі.

Ключові слова: ієрархічне середовище, гравітаційне поле, сейсмічне поле, ітераційний алгоритм моделювання.

NEW GEOINFORMATICS METHODS TO INTEGRATE SEISMIC AND GRAVITATIONAL FIELDS IN HIERARCHICAL MEDIUM

O.A. Hachay¹, O.Y. Khachay², A.Y. Khachay²

¹Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 100 Amundsen Str., Ekaterinburg 620016, Russian Federation, e-mail: olgakhachay@yandex.ru

²Ural Federal University, 19 Mira Str., Ekaterinburg 620002, Russian Federation, e-mail: khachay@yandex.ru, andrey.khachay@gmail.com

Purpose. In solving geological-geophysical mapping problems, wide use has recently been made of a block-layered structure model with inclusions of no hierarchic structure. For these models, devices and methods were designed to investigate 3D heterogeneous medium applying a theory suggested for geophysical data interpretation. A significant result of the previous century was a conclusion regarding the important role of a block hierarchic structure of rocks and missives in explaining the existence of a wide set of nonlinear geomechanical effects, and the appearance of complicated self-organizing geo systems in analyzing large and super large deposit formations. The hierarchic structure is characteristic of many systems, especially for the Earth's lithosphere, for which more than 30 hierarchic levels have been identified based on geophysical information. Thus in constructing new complex systems for geophysical investigation of the Earth's lithosphere this importation should be taken into account.

Methods. We constructed iteration algorithms for 2D modeling of sound wave diffraction and linear polarized transversal elastic wave on an inclusion with hierarchic elastic, located in the J -th layer of the N -layered elastic medium. We considered a case where the density of the inclusion of each rank differs from the density of the surrounded layer and the elastic parameters are equal to the elastic parameters of the surrounded layer. We used the method of integral and integral-differential equations for space frequency representation of the wave field distribution.

Findings. From the suggested theory it is evident that integrating seismic and gravitation fields it is necessary to use the data obtained by the systems of observation that are set to observe the medium hierarchical structure. The application of the density values, derived from the correlation dependence between the velocity values of the longitudinal wave obtained from the kinematic interpretation of seismic data, and the density, for constructing a density model based on gravitational data, can lead to a discrepancy of the obtained model and the matter content of the investigated geological medium.

Practical value/implications. These results may be useful in constructing new mapping systems of geological systems. They are especially significant in mapping oil and gas deposits and in forecasting their efficacy.

Keywords: hierarchical medium, gravitational field, seismic field, iteration modeling algorithm.

References:

1. Dmitrievskiy A.N. Izbrannie Trudy. Moscow, Nauka, 2009, vol. 2, 435 p. (in Russian).
2. Hachay O.A., Khachay A. Y. About integration seismic and electromagnetic active methods for mapping and monitoring the state of 2D heterogeneities in the N-layered medium. *Bulletin YuURGU. Series "Computer technologies, management and radio electronics"*, 2011, no. 2 (219), pp. 49-56 (in Russian).
3. Hachay O.A., Khachay A.Y. Modeling of electromagnetic and seismic field in hierarchic heterogeneous medium. *Bulletin YuURGU. Series "Computer mathematics and informatics"*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 48-55 (in Russian).
4. Hachay O.A., Khachay O.Y., Khachay A.Y. New geoinformatics methods for wave fields monitoring in hierarchic heterogeneous media. *Geoinformatika*, 2015, no. 3, pp. 45-51 (in Russian)
5. Hachay O.A., Khachay O.Y., Khachay A.Y. Defining of the surface of the anomaly stressed inclusion in hierarchic-layered medium, using acoustic monitoring data. *Mining information and analytical bulletin*, 2016, no. 4, pp. 354-366 (in Russian).

Received 16/05/2016