

К ВОПРОСУ ОБ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ АКТИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТАВНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

О.А. Хачай¹, А.Ю. Хачай², О.Ю. Хачай²

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

²Уральский 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

Разработан новый подход к интерпретации волновых полей, определению контуров или поверхностей составных локальных иерархических объектов, а также итерационный процесс решения теоретической обратной задачи для определения конфигураций 2D иерархических включений 1-го, m -го и s -го рангов, расположенных друг над другом в разных слоях N -слойной среды, и различных физико-механических свойств для акустического мониторинга. При интерпретации результатов мониторинга необходимо использовать данные таких систем наблюдения, которые могут быть настроены на исследование иерархической структуры среды. К таким системам относятся акустические (в динамическом варианте) и электромагнитные мониторинговые системы. Иерархичность структуры геологической среды отчетливо видна при анализе образцов горных пород, отобранных в рудных шахтах. Однако чем сложнее среда, тем больше информации привносит волновое поле о ее внутренней структуре, поэтому интерпретацию сейсмического и электромагнитного полей необходимо вести раздельно, не смешивая их базы данных. Данный результат содержится в явном виде уравнений теоретической обратной задачи для 2D электромагнитного поля (E - и H -поляризация), а также для распространения линейно поляризованной упругой волны при возбуждении N -слойной проводящей или упругой среды с иерархическим проводящим или упругим включением, расположенным в v -м слое. Рассмотрена обратная задача для усложненной иерархической модели включений.

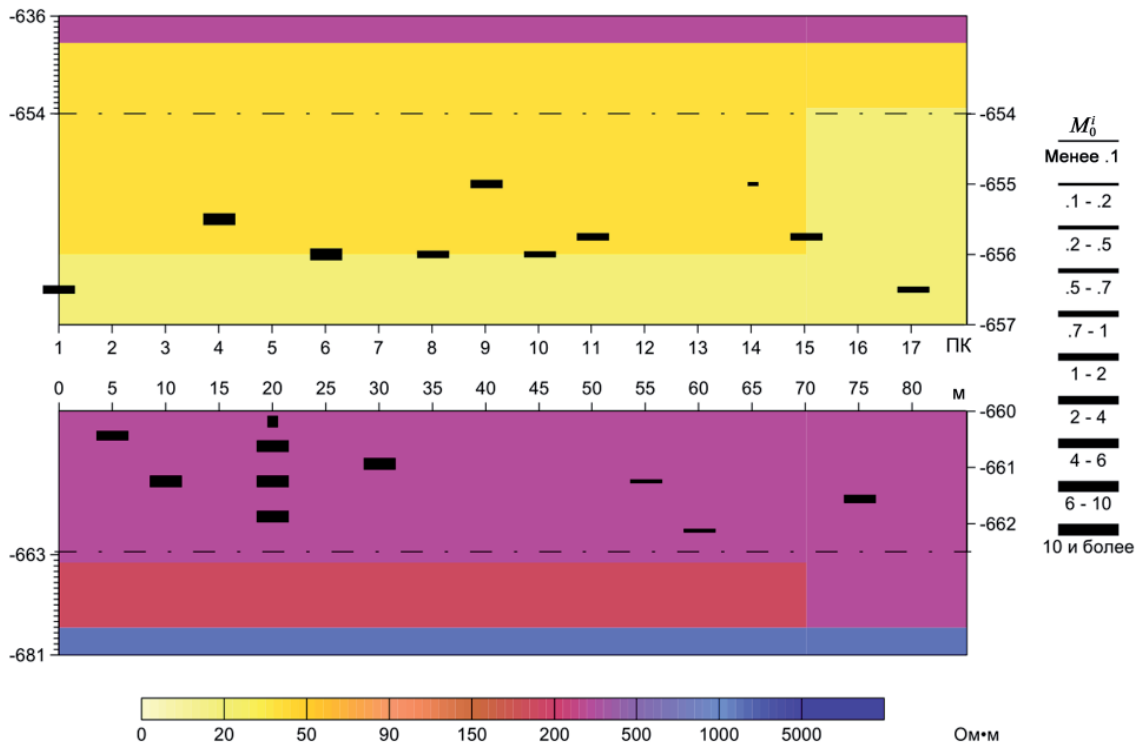
Ключевые слова: составная иерархическая среда, акустическое поле, итерационный алгоритм, уравнение теоретической обратной задачи.

Введение. Крупным результатом исследования стал вывод о фундаментальной роли блочно-иерархического строения горных пород и массивов для объяснения существования широкой гаммы нелинейных геомеханических эффектов и возникновения сложных самоорганизующихся геосистем. Иерархическая структура характерна для многих систем, особенно для литосферы Земли, где по геофизическим исследованиям выделено более 30 иерархических уровней — от тектонических плит протяженностью в тысячи километров до отдельных минеральных зерен миллиметрового размера [6]. Таким образом, земная кора представляет собой систему блоков и, как любой синергетический дискретный ансамбль, обладает свойствами иерархичности и самоподобия [3]. Известно, что геологическая среда является открытой динамической системой, испытывающей на разных масштабных уровнях естественное и искусственное воздействия, которые изменяют ее состояние, что приводит в результате к сложной многогранной иерархической эволюции [1, 7, 8, 17, 18].

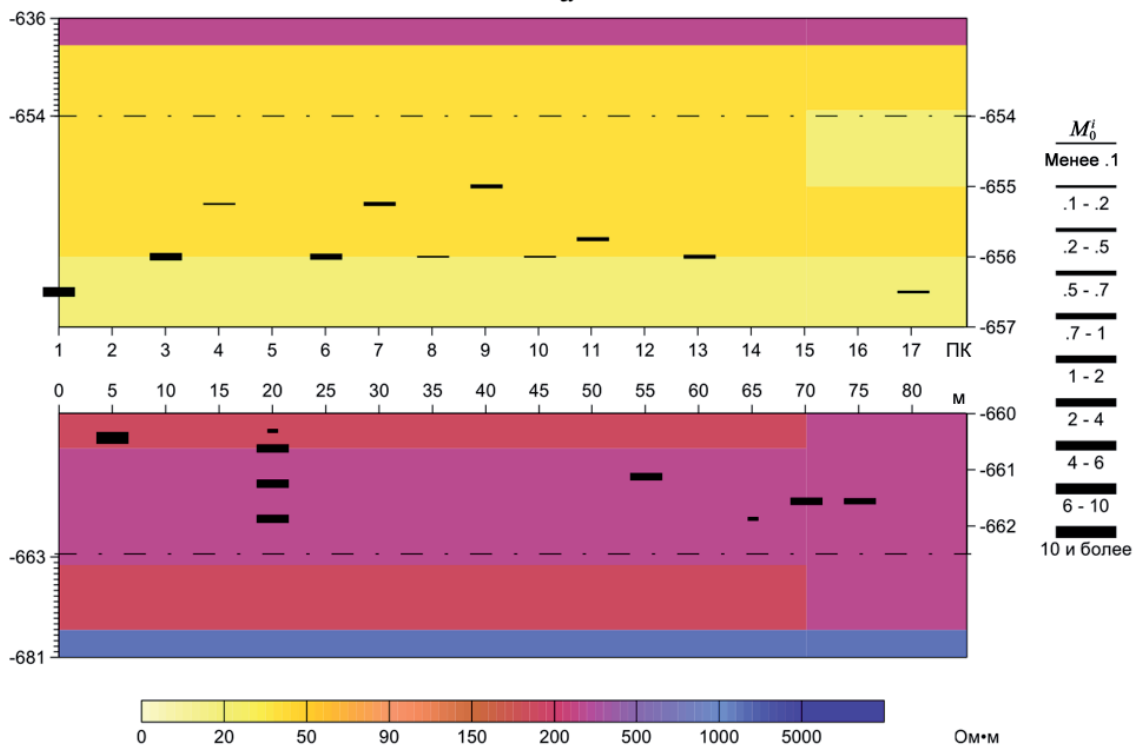
При ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород проявляется техногенная сейсмичность, вопросам прогноза и про-

филактики которой уделяется много внимания во всех странах с развитой горнодобывающей промышленностью. Важная роль здесь принадлежит краткосрочному прогнозу, методика выделения критериев для него все еще не разработана как в горном деле, так и в сейсмологии [2]. С точки зрения парадигмы физической мезомеханики, включающей в себя синергетический подход к изменению состояния массивов горных пород различного вещественного состава, данную проблему можно решить с помощью методов мониторинга, настроенных на изучение иерархических структурных сред [5, 11]. Изменения в среде, приводящие к краткосрочным предвестникам динамических явлений, объясняются в рамках концепции самоорганизованной критичности [4], для которой как главные критерии рассматриваются неоднородность и нелинейность [5].

Так, за 3 сут до горного удара в ортах 3, 4 Таштагольской шахты (рисунок) в геоэлектрических разрезах почвы были обнаружены субвертикальные дискретные структуры, в которые объединились зоны дезинтеграции. Эти структуры проявились в резонансном режиме на разных частотах и только на одной частоте для каждого из ортов. Такое явление зафиксировано ранее за 1 сут на шахте Естюнинская



a



б

Геоэлектрический разрез по профилю орт 4, горизонт -210 . Северо-Западный участок [10]: *a* — 6 августа; *б* — 8 августа 2007 г., частота 10,15 кГц; $\tilde{M}_0^i = M_0 \cdot L_0 \cdot 10^3$, где M_0 — коэффициент, на который умножается момент электрической токовой линии, эквивалентной по полю влиянию зоны геоэлектрической неоднородности, и который пропорционален отношению разности проводимостей во вмещающей среде и во включении к проводимости этой среды; L_0 — длина токовой линии; сопротивление вмещающего разреза приведено в омметрах; абсолютные отметки — в метрах; длина выработки — в пикетах и метрах

Geolectrical section along the profile of ort 4, horizon -210 , North-Western section [10]: *a* — August 6; *б* — August 8, 2007, frequency 10,15 kHz. $\tilde{M}_0^i = M_0 \cdot L_0 \cdot 10^3$, M_0 — coefficient, which multiplies the moment of the electric current line, which is equivalent in the field to the influence of the geoelectrical non-uniform zone, and which is proportional to the ratio of the difference between the conductivities in the containing medium and the inclusion to the conductivity in the containing medium; L_0 — the length of the current line; the resistance of the enclosing section is given in ohm.m. Vertically are shown the values in m (absolute elevations), horizontally — the length of the hole in pickets (PC) and meters

и шахте 15 СУБР. Появление указанных структур субвертикальной морфологии — предвестник сильного динамического события, однако для определения его места и магнитуды необходимо иметь информацию о состоянии массивов ортов и их принадлежности к соответствующим рангам устойчивости массива (см. статью [10]).

В настоящее время востребованы теоретические результаты по моделированию и интерпретации волновых полей, распространяющихся в слоистых блоковых средах с включениями иерархического строения. В работах [13—16] в рамках предложенной модели рассмотрена проблема построения алгоритма решения обратной задачи с использованием уравнения теоретической обратной задачи для 2D уравнения Гельмгольца; выписаны явные уравнения теоретической обратной задачи для случаев рассеяния электромагнитного поля (E - и H -поляризации) и рассеяния линейно поляризованной упругой волны в слоистой проводящей и упругой среде с иерархическим проводящим или упругим включением как основа для определения контуров несоосных включений 1-го ранга иерархической структуры.

В настоящей работе построен итерационный алгоритм решения обратной задачи с использованием явного уравнения теоретической обратной задачи для составного иерархического включения по данным акустического мониторинга.

Алгоритм решения обратной задачи 2D дифракции линейно поляризованной упругой поперечной волны для N -слойной среды с составными иерархическими включениями. В статье [16] решена обратная задача о дифракции линейно поляризованной упругой поперечной волны на двумерной упругой неоднородности иерархического типа, расположенной в слое v n -слойной среды. Эта задача рассмотрена в рамках усложненной модели: пластическая иерархическая неоднородность 1-го ранга расположена в слое $v-1$, максимальное значение неоднородности 1-го ранга равно L , ее начальное значение ll равно единице; упругая иерархическая неоднородность m -го ранга расположена в слое v , максимальное значение m -го ранга равно M , начальное значение m -го ранга — mm равно единице; аномально напряженная иерархическая неоднородность s -го ранга расположена в слое $v+1$, ее максимальное значение s -го ранга равно S , а начальное — ss равно единице. Рассмотрим алгоритм восстановления 2D поверхностей иерархических неоднородностей для случая, когда $L < M < S$.

Запишем уравнение теоретической обратной задачи [16] для скалярного уравнения Гельмгольца, к которому сводится рассматриваемая задача для слоя $v-1$:

$$2\pi U^+(M_0) = \int_{\partial D} \left(U_{v-1}^+(M) + U_{v-1}^l(M) \right) \times \left(\frac{\partial G^a(M, M_0)}{\partial n} - \left(\frac{b_{v-1}}{b_i} \right) \frac{\partial G(M, M_0)}{\partial n} \right) -$$

$$-b_{v-1} \left(\frac{\partial U_{v-1}^+}{\partial n} + \frac{\partial U_{v-1}^l}{\partial n} \right) \times \left(\left(\frac{1}{b_a} \right) G^a(M, M_0) - \left(\frac{1}{b_i} \right) G(M, M_0) \right) dl. \quad (1)$$

При этом

$$b_{v-1} = \xi_{v-1}; \quad b_i = \xi_i; \quad b_{a(v-1)l} = \xi_{a(v-1)l}; \quad l = ll.$$

Здесь ξ_{v-1} , ξ_i , $\xi_{a(v-1)l}$, ρ_{v-1} , ρ_i , $\rho_{a(v-1)l}$ — значения соответственно упругого параметра Ламе и плотности в $(v-1)$ -м слое, в слое, где находится точка M_0 , и внутри неоднородности в слое $v-1$; причем $\xi_{a(v-1)l} = \mu_{(v-1)al} = \mu_{(v-1)al}^e + \mu_{(v-1)al}^l \omega_{2(v-1)al}$ [15];

$$\xi_{v-1} = \mu_{v-1}; \quad \xi_i = \mu_i;$$

$$U^+ = u_x^+; \quad U_{v-1}^+ = u_{x(v-1)}^+; \quad U_{v-1}^l = u_{x(v-1)}^l,$$

где u_x — составляющая вектора смещения, отличная от нуля для выбранной модели.

Если $l > 1$, то $u_{x(v-1)}^l = u_{x(v-1)}$ (см. значение, вычисленное по формуле (8));

$$G(M, M_0) = G_{SS}(M, M_0);$$

$$G^a(M, M) = G_{SS}^a(M, M_0); \quad \partial D, \quad dL,$$

$$k_{2a(v-1)l}^2 = \omega^2 \frac{\rho_{a(v-1)l}}{\xi_{a(v-1)l}}; \quad k_{2(v-1)}^2 = \omega^2 \frac{\rho_{(v-1)}}{\xi_{(v-1)}}; \quad k_{2i}^2 = \omega^2 \frac{\rho_i}{\xi_i}.$$

Алгоритм вычисления функции Грина $G_{SS}(M, M_0)$ приведен в работе [9].

Таким образом, уравнение теоретической обратной задачи запишем в виде

$$2\pi u_{x(v-1)l}^+(M_0) = \int_{\partial D} \left(u_{x(v-1)l}^+(M) + u_{x(v-1)l}^l(M) \right) \times \left(\frac{\partial G_{SS}^{al}(M, M_0)}{\partial n} - \left(\frac{\xi_{(v-1)}}{\xi_i} \right) \frac{\partial G_{SS}(M, M_0)}{\partial n} \right) - \xi_{(v-1)} \left(\frac{\partial u_{x(v-1)l}^+}{\partial n} + \frac{\partial u_{x(v-1)l}^l}{\partial n} \right) \times \left(\left(\frac{1}{\xi_{a(v-1)l}} \right) G_{SS}^{al}(M, M_0) - \left(\frac{1}{\xi_i} \right) G_{SS}(M, M_0) \right) dL. \quad (2)$$

Решив уравнение (2) относительно функции $r_l(\varphi)$, описывающей контур ∂D , вычислим функции: $u_{x(v-1)}$; u_{xv}^+ ; $u_{x(v-1)l}^+$; $u_{x(v-1)l}^l$ по алгоритму решения прямой задачи [12] внутри и вне неоднородности, помещенной в слоистую среду; $u_{x(v-1)}^l$ — компонента упругого поля в слоистой среде при отсутствии неоднородности:

$$u_{x(v-1)}(M_0) = \frac{\xi_{(v-1)}}{\xi_{a(v-1)l}} u_{x(v-1)}^l(M_0) + \frac{k_{2a(v-1)l}^2 - k_{2v}^2}{2\pi} \iint_{S(v-1)l} u_{x(v-1)}(M) G_{SS}(M, M_0) dS +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\xi_v - \xi_{a(v-1)l}}{2\pi \xi_{a(v-1)l}} \int_{\partial D_{(v-1)l}} u_{x(v-1)}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dL; \\
& M_0 \in S_{(v-1)l}, \\
& u_{xv}^l(M_0) = u_{x(v-1)}^l(M_0) + \\
& + \frac{\xi_{a(v-1)l} (k_{2a(v-1)l}^2 - k_{2v}^2)}{2\pi \xi(M_0)} \times \\
& \times \iint_{S(v-1)l} u_{x(v-1)}(M) G_{SS}(M, M_0) dS + \\
& + \frac{(\xi_v - \xi_{a(v-1)l})}{2\pi \xi(M_0)} \int_{\partial D_{(v-1)l}} u_{x(v-1)}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dL; \\
& M_0 \notin S_{(v-1)l}. \tag{3}
\end{aligned}$$

Запишем уравнение теоретической обратной задачи [16] для скалярного уравнения Гельмгольца, к которому сводится рассматриваемая задача для слоя v , $m=mm$:

$$\begin{aligned}
2\pi U^+(M_0) &= \int_{\partial D} (U_v^+(M) + U_v^l(M)) \times \\
& \times \left(\frac{\partial G^a(M, M_0)}{\partial n} - \left(\frac{b_v}{b_i} \right) \frac{\partial G(M, M_0)}{\partial n} \right) - \\
& - b_v \left(\frac{\partial U_v^+}{\partial n} + \frac{\partial U_v^l}{\partial n} \right) \left(\left(\frac{1}{b_a} \right)^a (M, M_0) - \right. \\
& \left. - \left(\frac{1}{b_i} \right) G(M, M_0) \right) dL. \tag{4}
\end{aligned}$$

При этом

$$b_v = \xi_v; \quad b_i = \xi_i; \quad b_{a(v)m} = \xi_{a(v)m}.$$

Здесь $\xi_v, \xi_i, \xi_{a(v)m}, \rho_v, \rho_i, \rho_{a(v)m}$ — значения соответственно упругого параметри Ламе и плотность в (v) -м слое, в слое, где находится точка M_0 , и внутри неоднородности в слое v , при этом

$$\begin{aligned}
\xi_{a(v)m} &= \mu_{(v)am} = \mu_{(v)am}^e; \quad \xi_v = \mu_v; \quad \xi_i = \mu_i; \\
U^+ &= u_x^+; \quad U_v^+ = u_{x(v)}^+; \quad U_v^l = u_{x(v)}^l = u_{x(v)l},
\end{aligned}$$

вычисленное по формуле (3), где u_x — составляющая вектора смещения, отличная от нуля для выбранной модели.

$$G(M, M_0) = G_{SS}(M, M_0);$$

$$G^a(M, M) = G_{SS}^a(M, M_0); \quad \partial D, dl,$$

$$k_{2a(v)m}^2 = \omega^2 \frac{\rho_{a(v)m}}{\xi_{a(v)m}}; \quad k_{2(v)}^2 = \omega^2 \frac{\rho(v)}{\xi(v)}; \quad k_{2i}^2 = \omega^2 \frac{\rho_i}{\xi_i}.$$

Таким образом, уравнение теоретической обратной задачи запишем в виде

$$2\pi u_{x(v)m}^+(M_0) = \int_{\partial D_m} (u_{x(v)m}^+(M) + u_{x(v)}^l(M)) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{\partial G_{SS}^{am}(M, M_0)}{\partial n} - \left(\frac{\xi_{(v)}}{\xi_i} \right) \frac{\partial G_{SS}(M, M_0)}{\partial n} \right) - \\
& - \xi_{(v)} \left(\frac{\partial u_{x(v)m}^+}{\partial n} + \frac{\partial u_{x(v)}^l}{\partial n} \right) \left(\left(\frac{1}{\xi_{a(v)m}} \right) G_{SS}^{am}(M, M_0) - \right. \\
& \left. - \left(\frac{1}{\xi_i} \right) G_{SS}(M, M_0) \right) dL; \tag{5}
\end{aligned}$$

Решив уравнение (5) относительно функции $r_m(\varphi)$, описывающей контур ∂D_m , вычислим функции: $u_{x(v)}; u_{x(v)m}^+; u_{x(v)}^l$ по алгоритму решения прямой задачи [12] внутри и вне неоднородности, помещенной в слоистую среду; $u_{x(v)}^l$ — компонента упругого поля в слоистой среде при отсутствии неоднородности:

$$\begin{aligned}
u_{x(v)}(M_0) &= \frac{\xi_{(v)}}{\xi_{a(v)m}} u_{x(v)}^l(M_0) + \\
& + \frac{k_{2a(v)m}^2 - k_{2v}^2}{2\pi} \iint_{S(v)m} u_{x(v)}(M) G_{SS}(M, M_0) dS + \\
& + \frac{\xi_v - \xi_{a(v)m}}{2\pi \xi_{a(v)m}} \int_{\partial D_{(v)m}} u_{x(v)}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dl; \\
& M_0 \in S_{(v)m}, \\
u_{x(v+1)m}(M_0) &= u_{x(v)}^l(M_0) + \\
& + \frac{\xi_{a(v)m} (k_{2a(v)m}^2 - k_{2v}^2)}{2\pi \xi(M_0)} \iint_{S(v)m} u_{xv}(M) G_{SS}(M, M_0) dS + \\
& + \frac{(\xi_v - \xi_{a(v-1)m})}{2\pi \xi(M_0)} \int_{\partial D_{(v)m}} u_{xv}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dL; \\
& M_0 \notin S_{(v)m}. \tag{6}
\end{aligned}$$

Запишем уравнение теоретической обратной задачи [16] для скалярного уравнения Гельмгольца, к которому сводится рассматриваемая задача, для слоя $v+1$, $s=ss$:

$$\begin{aligned}
2\pi U^+(M_0) &= \int_{\partial D} (U_{v+1}^+(M) + U_{v+1}^l(M)) \times \\
& \times \left(\frac{\partial G^a(M, M_0)}{\partial n} - \left(\frac{b_{v+1}}{b_i} \right) \frac{\partial G(M, M_0)}{\partial n} \right) - \\
& - b_{v+1} \left(\frac{\partial U_{v+1}^+}{\partial n} + \frac{\partial U_{v+1}^l}{\partial n} \right) \left(\left(\frac{1}{b_a} \right) G^a(M, M_0) - \right. \\
& \left. - \left(\frac{1}{b_i} \right) G(M, M_0) \right) dL. \tag{7}
\end{aligned}$$

При этом

$$b_{v+1} = \xi_{v+1}; \quad b_i = \xi_i; \quad b_{a(v+1)s} = \xi_{a(v+1)s};$$

$\xi_v, \xi_i, \xi_{a(v)s}, \rho_v, \rho_i, \rho_{a(v)s}$ — значения упругого параметра Ламе и плотность в $(v+1)$ -м слое, в слое, где находится точка M_0 , и внутри неоднородности в слое $v+1$, причем

$$\xi_{a(v+1)s} = \mu_{(v+1)as} = \mu_{(v+1)as}^e; \quad M_0 \notin S_{(v+1)s}, \quad (8)$$

$$\xi_{v+1} = \mu_{v+1}; \quad \xi_i = \mu_i; \quad \rho_i = \rho_{a(v+1)s},$$

$$U^+ = u_x^+; \quad U_{v+1}^+ = u_{x(v+1)}^+; \quad U_{v+1}^l = u_{x(v+1)}^l = u_{x(v+1)m},$$

вычисленное по формуле (6), где u_x — составляющая вектора смещения, отличная от нуля для выбранной модели;

$$G(M, M_0) = G_{SS}(M, M_0);$$

$$G^a(M, M) = G_{SS}^a(M, M_0); \quad \partial D, \quad dl;$$

$$k_{2a(v+1)s}^2 = \omega^2 \frac{\rho_{a(v+1)s}}{\xi_{a(v+1)s}}; \quad k_{2(v+1)}^2 = \omega^2 \frac{\rho_{(v+1)}}{\xi_{(v+1)}}; \quad k_{2i}^2 = \omega^2 \frac{\rho_i}{\xi_i}.$$

Таким образом, уравнение теоретической обратной задачи запишем в виде

$$2\pi u_{x(v+1)s}^+(M_0) = \int_{\partial D_s} \left(u_{x(v+1)s}^+(M) + u_{x(v+1)}^l(M) \right) \times \\ \times \left(\frac{\partial G_{SS}^{as}(M, M_0)}{\partial n} - \left(\xi_{(v+1)} / \xi_i \right) \frac{\partial G_{SS}(M, M_0)}{\partial n} \right) - \\ - \xi_{(v+1)} \left(\frac{\partial u_{x(v+1)s}^+}{\partial n} + \frac{\partial u_{x(v+1)}^l}{\partial n} \right) \times \quad (8)$$

$$\times \left(\left(1 / \xi_{a(v+1)s} \right) G_{SS}^{as}(M, M_0) - \left(1 / \xi_i \right) G_{SS}(M, M_0) \right) dL.$$

Решив уравнение (8) относительно функции $r_s(\varphi)$, описывающей контур ∂D_s , вычислим функции: $u_{x(v+1)}$; $u_{x(v+1)s}^+$; $u_{x(v+1)}^l$ по алгоритму решения прямой задачи [12] внутри и вне неоднородности, помещенной в слоистую среду; $u_{x(v+1)}^l$ — компонента упругого поля в слоистой среде при отсутствии неоднородности:

$$u_{x(v+1)}(M_0) = \frac{\xi_{(v+1)}}{\xi_{a(v+1)s}} u_{x(v+1)}^l(M_0) + \\ + \frac{k_{2a(v+1)s}^2 - k_{2(v+1)}^2}{2\pi} \iint_{S(v+1)s} u_{x(v+1)}(M) G_{SS}(M, M_0) dS + \\ + \frac{\xi_{v+1} - \xi_{a(v+1)s}}{2\pi \xi_{a(v+1)s}} \int_{\partial D_{(v+1)s}} u_{x(v+1)}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dL;$$

$$M_0 \in S_{(v+1)s}.$$

Если ранг $l \leq L$, то вычисляются $u_{x(v-1)}(M_0)$ по формуле

$$u_{x(v-1)}(M_0) = u_{x(v+1)}^l(M_0) + \frac{\xi_{a(v+1)s} (k_{2a(v+1)s}^2 - k_{2(v+1)}^2)}{2\pi \xi(M_0)} \times \\ \times \iint_{S(v+1)s} u_{x(v+1)}(M) G_{SS}(M, M_0) dS + \\ + \frac{(\xi_{v+1} - \xi_{a(v+1)s})}{2\pi \xi(M_0)} \int_{\partial D_{(v+1)s}} u_{x(v+1)}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dL;$$

$l=l+1$. Переходим к уравнению (1).

Если ранг $l > L$, а $m \leq M$, то вычисляются $u_{x(v)}(M_0)$ по формуле

$$u_{x(v)}(M_0) = u_{x(v+1)}^l(M_0) + \frac{\xi_{a(v+1)s} (k_{2a(v+1)s}^2 - k_{2(v+1)}^2)}{2\pi \xi(M_0)} \times \\ \times \iint_{S(v+1)s} u_{x(v+1)}(M) G_{SS}(M, M_0) dS + \\ + \frac{(\xi_{v+1} - \xi_{a(v+1)s})}{2\pi \xi(M_0)} \int_{\partial D_{(v+1)s}} u_{x(v+1)}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dL;$$

$M_0 \notin S_{(v+1)s}$; $mm=mm+1$. Переходим к формуле (4).

Если ранг $m > M$, то вычисляем $u_{x(v+1)}(M_0)$ по формуле

$$u_{x(v+1)}(M_0) = u_{x(v+1)}^l(M_0) + \frac{\xi_{a(v+1)s} (k_{2a(v+1)s}^2 - k_{2(v+1)}^2)}{2\pi \xi(M_0)} \times \\ \times \iint_{S(v+1)s} u_{x(v+1)}(M) G_{SS}(M, M_0) dS + \\ + \frac{(\xi_{v+1} - \xi_{a(v+1)s})}{2\pi \xi(M_0)} \int_{\partial D_{(v+1)s}} u_{x(v+1)}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dL;$$

$$M_0 \in S_{(v+1)s}.$$

$ss=ss+1$. Переходим к формуле (7). Если ранг $s > S$, то вычисляем $u_x(M_0)$ во всех слоях: $v=1:N$ по формуле

$$u_{x(v+1)}(M_0) = u_{x(v+1)}^l(M_0) + \frac{\xi_{a(v+1)s} (k_{2a(v+1)s}^2 - k_{2(v+1)}^2)}{2\pi \xi(M_0)} \times \\ \times \iint_{S(v+1)s} u_{x(v+1)}(M) G_{SS}(M, M_0) dS + \\ + \frac{(\xi_{v+1} - \xi_{a(v+1)s})}{2\pi \xi(M_0)} \int_{\partial D_{(v+1)s}} u_{x(v+1)}(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dL;$$

$$M_0 \notin S_{(v+1)s}.$$

Результатом является восстановление всех вложенных поверхностей иерархических неоднородностей согласно рангам их иерархии и заданным физико-механическим свойствам.

Заключение. При решении обратной задачи в качестве исходных данных мониторинга необходимо использовать системы наблюдения, настроенные на исследование иерархической структуры среды. Вместе с тем, чем сложнее среда, тем больше информации о ее внутренней структуре привносит каждое волновое поле. Поэтому интерпретацию сейсмического и электромагнитного полей необходимо вести отдельно, не смешивая их базы данных. Из построенной теории следует, что с увеличением степени иерархичности среды увеличивается сте-

пень пространственной нелинейности распределения составляющих сейсмического и электромагнитного полей, что свидетельствует о невозможности использования методов линеаризации задачи при создании методов интерпретации.

Список библиографических ссылок

1. Булашевич Ю.П., Хачай Ю.В. Конвективная устойчивость земных недр с внутренними источниками тепла. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1975. № 12. С. 13–19.
2. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Мальцев В.А. Особенности прогноза и профилактики мощных динамических явлений в природно-технических системах. Международная конференция «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Новосибирск, 2–4 октября 2001 г. Новосибирск: СО РАН, 2001. С. 326–334.
3. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2003. 424 с.
4. Олемской А.И., Кацнельсон А.А. Синергетика конденсированной среды. Москва: УРСС, 2003. 335 с.
5. Панин В.Е. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. СИФР. 365 с.
6. Прангишвили И.В., Пашенко Ф.Ф., Бусыгин Б.П. Системные законы и закономерности в электродинамике, природе и обществе. Москва: Наука, 2001. 525 с.
7. Тихонов А.Н., Любимова Е.А., Власов В.К. Об эволюции зон проплавления в термической истории Земли. *Доклады АН СССР*. 1969. Т. 188. № 2. С. 338–342.
8. Трубицын В.П. Тектоника плавающих континентов. *Вестник РАН*. 2005. № 1. С. 10–21.
9. Хачай А.Ю. Алгоритмы для математического моделирования переменных электромагнитных и сейсмических полей в источниковом приближении. Дис. ... канд. геол. наук. Екатеринбург: УрГУ им. А.М. Горького, 2007. 176 с.
10. Хачай О.А. Исследование развития неустойчивости в массиве горных пород с использованием метода активного электромагнитного мониторинга. *Физика Земли*. 2007. № 4. С. 65–70.
11. Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Хачай О.Ю. и др. Результаты геофизических и геологических исследований на шахте Естюнинская. Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Четвертые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича, 02–06 июля 2007 г. Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2007. С. 197–199.
12. Хачай О.А., Хачай А.Ю. Моделирование электромагнитного и сейсмического поля в иерархически неоднородных средах. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. 2013. Т. 2, № 2. С. 48–55.
13. Hachay O.A., Khachay A.Yu. Defining the surface of the fluid-saturated porous inclusion in the hierarchic layered-block medium according to electromagnetic monitoring data. *Oil and Gas exploration. Methods and Application*. AGU, Willey, 2017. P. 143–151.
14. Hachay O.A., Khachay A.Y., Khachay O.Y. Modeling and Interpretation Wave Fields in Hierarchical Heterogeneous Medium. *Soil testing, Soil stability and ground improvement*. Proceedings of the 1st International Congress and Exhibition Egypt 2017 on Sustainable Civil Infrastructures. Springer, 2017. P. 311–319.
15. Хачай О.А., Хачай А.Ю., Хачай О.Ю. Определение поверхности иерархического пластического включения в слоисто-блоковой среде по данным акустического мониторинга. *Геоинформатика*, 2017. № 3. С. 30–36.
16. Хачай О.А., Хачай О.Ю., Хачай А.Ю. К вопросу об обратной задаче активного электромагнитного и акустического мониторинга иерархической геологической среды. *Геофизические исследования*. 2017. Т. 18, № 4. С. 71–84. DOI:10.21455/gr2017/4-6.
17. Хачай Ю.В. Термическая эволюция дифференцируемой верхней мантии. *Геология и геофизика*. 1979. № 1. С. 83–92.
18. Хачай Ю.В. Уширение конвективной ячейки и возможность локализации конвекции в верхней мантии. *Физика Земли*. 1982. № 12. С. 19–28.

Поступила 14.02.2019 г.

ДО ПИТАННЯ ПРО ОБЕРНЕНУ ЗАДАЧУ АКТИВНОГО АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ СКЛАДЕНОГО ІЄРАРХІЧНОГО ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

О.О. Хачай¹, А.Ю. Хачай², О.Ю. Хачай²

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича. УрО РАН, Екатеринбург, Россия olgakhachay@yandex.ru

²Уральский Федеральный Университет им. Б. М. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Розроблено новий підхід до інтерпретації хвильових полів, визначення контурів або поверхонь складених локальних ієрархічних об'єктів, а також ітераційний процес розв'язку теоретичної оберненої задачі для визначення конфігурацій 2D ієрархічних включень 1-го, m -го і s -го рангів, розташованих один над одним у різних шарах N -шарового середовища, і різних фізико-механічних властивостей для акустичного моніторингу. При інтерпретації результатів моніторингу слід використовувати дані таких систем спостереження, які можуть бути налаштовані на дослідження ієрархічної структури середовища. До таких систем належать акустичні (у динамічному варіанті) та електромагнітні моніторингові системи. Ієрархічність структури геологічного середовища чітко спостерігають при аналізі зразків гірських порід, відібраних у рудних шахтах. Однак чим складніше

середовище, тим більше інформації привносить кожне хвильове поле про його внутрішню структуру, тому інтерпретацію сейсмічного та електромагнітного полів необхідно вести окремо, не змішуючи їхні бази даних. Цей результат міститься в явному вигляді рівнянь теоретичної оберненої задачі для 2D електромагнітного поля (E - і H -поляризація), а також для поширення лінійно поляризованої пружної хвилі при збудженні N -шарового провідного або пружного середовища з ієрархічним провідним або пружним включенням, розташованим у v -му шарі. Розглянуто обернену задачу для ускладненої ієрархічної моделі включень.

Ключові слова: складене ієрархічне середовище, акустичне поле, ітераційний алгоритм, рівняння теоретичної оберненої задачі.

DEFINING OF THE 2-D SURFACES OF THE COMBINED HIERARCHICAL OBJECT LOCATED IN THE LAYERED BLOCKED GEOLOGICAL MEDIUM USING THE DATA OF ACTIVE ACOUSTIC MONITORING

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

¹*Institute of Geophysics UB RAS (Yekaterinburg, Russian Federation) Dr.Sci(Phys.-Math.), Leading researcher, Institute of geophysics UB RAS, Amundsen str. 100, Ekaterinburg, Russia, e-mail: olgakhachay@yandex.ru*

²*Ural Federal University (Yekaterinburg, Russian Federation) PhD, associated prof. URFU, 620002. Mira str. 19. Ekaterinburg, Russia, e-mail: andrey.khachay@gmail.com*

Purpose. Geological medium is an open system which is influenced by outer and inner factors that can lead it to a unstable state. That non stability is as a rule occurred locally and these zones are named as dynamically active elements, which are indicators of potential catastrophic sources. These objects differ from the embedded geological medium by their structural forms, which often are of hierarchical type. The process of their activation can be searched, using wave fields monitoring. For that purpose we had developed earlier new algorithms of modeling wave field propagation through the local objects with hierarchical structure. Here we had developed a new approach for interpretation the distribution of acoustic fields for defining the contours of these local plastic hierarchical objects.

Design/methodology/approach. We developed an algorithm for constructing the equation of theoretical inverse problem for 2D linear polarized longitudinal elastic wave by excitation of the N -layered elastic medium with combined hierarchic plastic, elastic and density inclusions located in the $(v-1)$, v and $(v+1)$ elastic layers. An iteration process of solving the inverse problem for the case of certain configurations of hierarchical inclusions 2D l , m , s rank is elaborated. The ranks are different and they are limited by L, M , and S data.

Findings. From the theory it is obviously that for such complicated medium when we use different wave field each field contains its own information about the inner structure of the hierarchical inclusion. Therefore it is needed to interpret the monitoring data for each wave field apart, and not mixes the data base. When interpreting the results of the monitoring need to use the data of such systems that are configured to study the hierarchical structure of the medium.

Practical value/implications. These results will be the base for constructing new systems of monitoring observations of dynamical geological systems. Especially it is needed to prevent rock shocks in deep mines by their exploitation or natural hazards.

Keywords: combined hierarchic medium, acoustic field, iteration algorithms of interpretation, new equation of theoretical inverse problem.

References

1. Bulashevitch Yu.P., Khachai Yu.V. Convective stability of the Earth's interior with internal heat sources. *Izvestia AN USSR. Physics of the Earth*. 1975. N 12. P. 13–19.
2. Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Panin V.I., Maltsev V.A. Features of the forecast and prevention of powerful dynamic phenomena in natural-technical systems. International conference «Geodynamics and stress state of the Earth's interior». Novosibirsk, October 2–4, 2001. Novosibirsk: SB RAS, 2001. P. 326–334.
3. Kocharjan G.G., Spivak A.A. Dynamics of block arrays deformation. Moscow: ICC «Akademkniga», 2003. 424 p.
4. Olemskoj A.I., Katsnelson A.A. Synergetics of a condensed medium. Moscow, URSS, 2003. 335 p.
5. Panin V.E. Physical mesomechanics and computer-aided construction of materials. Novosibirsk: Science, 1995. Vol. 1. CIFR. 365 p.
6. Prangishvili I.V., Pashchenko F.F., Busigin B.P. System laws and patterns in electrodynamics, nature and society. Moscow: Nauka, 2001. 525 p.
7. Tikhonov A.N., Lubimova E.A., Vlasov V.K. On the evolution of penetration zones in the thermal history of the Earth. *Doklady DAN USSR*. 1969. Vol. 188, N 2. P. 338–342.
8. Trubitsin V.P. Tectonics of floating continents. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2005. N 1. P. 10–21.
9. Khachay A.Yu. Algorithms for mathematical modeling of variable electromagnetic and seismic fields in the source approximation. PhD thesis. Ekaterinburg: Ural State University named after A.M. Gorky, 2007. 176 p.
10. Khachay O.A. Study of the development of instability in the rock mass using the method of active electromagnetic monitoring. *Physics of the Earth*. 2007. N 4. P. 65–70.

11. Hachay O.A., Novgorodova E.N., Khachay O.Yu. et al. The results of geophysical and geological research at the Estyuninsky mine. Depth structure, geodynamics, thermal field of the Earth, interpretation of geophysical fields. The fourth scientific readings in the memory of Yu.P. Bulashevitch, July 02—06, 2007. Ekaterinburg: Institute of Geophysics of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. P. 197—199.
12. Hachay O.A., Khachay A.Yu. Modeling of the electromagnetic and seismic fields in hierarchically inhomogeneous media. *SURGU Bulletin. Computational Mathematics and Computer Science*. 2013. Vol. 2, N 2. P. 48—55.
13. Hachay O.A., Khachay A.Yu. The definition of a fluidized-block environment is subject to electromagnetic monitoring data. *Oil and Gas exploration. Methods and Application*. Willey: AGU, 2017. P. 143—151.
14. Hachay O.A., Khachay A.Y., Khachay O.Y. Modeling and Interpretation of the Wave Fields in Hierarchical Heterogeneous Medium. Soil testing, Soil stability and ground improvement. Egypt 2017 on Sustainable Civil Infrastructure. Springer, 2017. P. 311—319.
15. Hachay O.A., Khachay A.Yu., Khachay O.Yu. Determination of the surface of a hierarchical plastic inclusion in a layered-block medium according to acoustic monitoring data. *Geoinformatics*. 2017. N 3. P. 30—36.
16. Hachay O.A., Khachay O.Yu., Khachay A.Yu. On the question of the inverse problem of active electromagnetic and acoustic monitoring of a hierarchical geological environment. *Geophysical surveys*. 2017. Vol. 18, N 4. P. 71—84. DOI: 10.21455/gr2017/4-6.
17. Khachay Yu.V. Thermal evolution of a differentiable upper mantle. *Geology and Geophysics*. 1979. N 1. P. 83—92.
18. Khachay Yu.V. Expansion of a convective cell and the possibility of localization of convection in the upper mantle. *Physics of the Earth*. 1982. N 12. P. 19—28.

Received 14/02/2019