

НОВЫЕ МЕТОДЫ ГЕОИНФОРМАТИКИ МОНИТОРИНГА ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СРЕДАХ

О.А. Хачай¹, О.Ю. Хачай², А.Ю. Хачай²

¹Институт геофизики УрО РАН, ул. Амундсена, 100, Екатеринбург 620016, Российская Федерация, e-mail: olgakhachay@yandex.ru

²Уральский Федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург 620002, Российская Федерация, e-mail: andrey.khachay@gmail.com, khachay@yandex.ru

Построен алгоритм 3D моделирования электромагнитного поля для произвольного типа источника возбуждения N -слойной среды с иерархическим проводящим включением, расположенным в J -м слое. Построены алгоритмы 2D моделирования для дифракции звука и линейно поляризованной поперечной упругой волны на включении с иерархической структурой, расположенном в J -м слое N -слойной упругой среды. Выписаны уравнения теоретической обратной задачи для 2D электромагнитного поля E - и H -поляризации и линейно поляризованной упругой волны при возбуждении N -слойной проводящей или упругой среды с иерархическим проводящим или упругим включением, расположенным в v -м слое. Из построенной теории следует, что при интерпретации данных мониторинга необходимо использовать такие данные, которые получены в рамках систем наблюдения, настроенных на исследование иерархической структуры среды. В случае более сложной среды каждое волновое поле привносит свою информацию о ее внутренней структуре, поэтому интерпретацию сейсмического и электромагнитного поля необходимо вести раздельно, не смешивая эти базы данных.

Ключевые слова: иерархическая среда, электромагнитное поле, сейсмическое поле, итерационный алгоритм, уравнение теоретической обратной задачи.

Введение. Геологическая среда представляет собой открытую систему, на которую воздействуют как внешние, так и внутренние факторы, что может привести ее в неустойчивое состояние. Проявление неустойчивости, как правило, происходит локально, и такие зоны геологической среды называются динамически активными элементами, которые являются индикаторами потенциальных источников аварий и катастроф. Эти объекты обладают отличными от вмещающей геологической среды физико-механическими свойствами и способностью в резонансном режиме реагировать на внешние и внутренние воздействия, связанные с изменениями напряженно-деформированного состояния в их окрестности. Кроме того, данные объекты обладают способностью изменять свою конфигурацию и структуру в пространстве и во времени, что осложняет задачу прогноза состояния и степени аварийной опасности. В работе О.А. Хачай [13] изложены принципы построения систем мониторинга природно-техногенных аварий и катастроф с использованием сейсмических и электромагнитных полей в пассивном и активном режимах возбуждения, в которых составной частью являются задачи картирования динамически активных зон.

В настоящее время для решения задач геолого-геофизического картирования широко используется модель слоисто-блоковой среды с включе-

ниями не иерархического строения, в рамках которой созданы аппаратно-методические комплексы изучения трехмерных неоднородных сред с соответствующей теорией интерпретации геофизических данных [9]. При изучении пространственно-временных изменений структуры, физических свойств геологической среды или массива горных пород и связанного с ними напряженно-деформированного или фазового состояния модель слоисто-блоковой среды с включениями усложняется: она представляет собой двуранговую цепочку в общей иерархически неоднородной модели среды. Модель иерархически неоднородной среды для описания процессов деформирования и разрушения геофизической среды впервые была предложена академиком М.А. Садовским [8]. Развитию и использованию иерархично-блоковой модели среды на качественном уровне посвящены работы сотрудников Института физики Земли РАН [1, 7]. Для понимания формирования и развития иерархии структурных уровней деформации в твердых телах важную роль играют теоретические и экспериментальные результаты, полученные на образцах [6], с помощью которых обоснован подход, базирующийся на представлении о диссипативных структурах в неравновесных системах [5]. В работах [2, 3] Н.А. Караевым обобщены результаты сейсмических исследований по выделению участков земной коры со строени-

ем гетерогенного типа. Гетерогенность, по мнению автора, – важнейшая особенность горных пород, обусловленная неравномерностью распределения в пространстве геологических неоднородностей в виде включений всех масштабов, т. е. по сути для изучения строения и динамики гетерогенных участков земной коры необходимо использовать представления об иерархичных моделях. Явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок, связанные с дискретностью и фрагментацией среды, описаны академиком Е.И. Шемякиным с соавторами [15] и получили статус открытия [16]. Эти явления имеют место как в неглубоких (до глубины 500 м), так и в глубоких шахтах (глубина более 500 м). Согласно результатам геолого-геофизических исследований сверхглубоких скважин, с увеличением глубины сложность геологического строения среды не уменьшается. Наконец, проблема мониторинга и прогноза состояния геологической среды требует тщательного отбора из имеющихся методик исследования трехмерных сред, допускающих пространственно-временное (частотное) масштабирование и фокусирование.

Настоящая статья посвящена разработке алгоритма моделирования электромагнитного эффекта в рамках частотно-геометрической методики при исследовании погруженного в горизонтально-слоистую среду проводящего включения с иерархической структурой.

Алгоритм моделирования распространения переменного электромагнитного поля в N -слойной среде с проводящим включением иерархического типа. Алгоритм построен с использованием итерационного подхода решения объемных интегральных уравнений для переменного электромагнитного поля в частотной области. Алгоритм для модели – проводящее включение в произвольном слое пятислойной среды при возбуждении электромагнитного поля плоской волной, вертикальным магнитным или горизонтальным электрическим диполем – изложен в работе [12].

Пусть локальная неоднородность имеет следующую структуру: на первом иерархическом уровне – это неоднородность объема V_1 с проводимостью σ_{a1} , на втором уровне – неоднородности, расположенные внутри объема V_1 и занимающие объем V_2 с проводимостями σ_{a1} в общем случае. Рассмотрим более простой случай, когда неоднородности второго и большего ранга имеют внутри своего ранга одинаковую проводимость, т. е. σ_{a2} . Неоднородности третьего ранга занимают объем V_3 в пределах объема V_2 с проводимостью σ_{a3} и т. д. Параметры вмещающей горизонтально-слоистой среды имеют вид $\{\sigma_k, h_k\}$, где $k = 1, \dots, N$, h_k – суммарные мощности слоев, i – номер ранга или иерархического уровня. Задача рассматривается для магнитооднородной среды в квазистационарном приближении.

Объемные интегральные уравнения и, соответственно, интегральные представления для составляющих электрического и магнитного поля выписываются в виде

$$\vec{E}_i(M_0) = \vec{E}_0^{i-1}(M_0) + (\sigma_{ai} - \sigma_{k(M_0)}) \times \int_{V_i} \vec{E}_i(M) \hat{G}_E(M, M_0) dV_i, \quad (1)$$

$$\vec{H}_i(M_0) = \vec{H}_0^{i-1}(M_0) + \left(\frac{\sigma_{ai} - \sigma_{k(M_0)}}{i\omega\mu_0} \right) \times \int_{V_i} \vec{H}_i(M) \hat{G}_H(M, M_0) dV_i, \quad (2)$$

где i – номер итерации, связанной с номером иерархического уровня; $\hat{G}_E(M, M_0)$ и $\hat{G}_H(M, M_0)$ – тензоры Грина слоистой среды, которые определяются известным способом, описанным в работе [12]. При $i = 1$ $\vec{E}_0^{i-1}(M_0)$ и $\vec{H}_0^{i-1}(M_0)$ – составляющие напряженностей электрического и магнитного возбуждающего или нормального поля слоистой среды. При $i = 2, \dots, L$ $\vec{E}_0^{i-1}(M_0)$ и $\vec{H}_0^{i-1}(M_0)$ – составляющие напряженностей электрического и магнитного поля предыдущего ранга с учетом неоднородностей предыдущего ранга. Распределение электрического и магнитного поля можно анализировать последовательно на каждом итерационном этапе перед включением неоднородностей нового иерархического уровня.

Моделирование дифракции звука на двумерной упругой неоднородности иерархического типа, расположенной в N -слойной среде. В статье [14] описан алгоритм моделирования дифракции звука на двумерном упругом однородном включении, расположенном в J -м слое N -слойной среды:

$$\begin{aligned} & \frac{(k_{1ji}^2 - k_{1j}^2)}{2\pi} \iint_{S_c} \varphi(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{ji}} \varphi^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{ji})}{\sigma_{ji} 2\pi} \oint_C G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi}{\partial n} dc = \varphi(M^0), M^0 \in S_c, \\ & \frac{\sigma_{ji}(k_{1ji}^2 - k_{1j}^2)}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{S_c} \varphi(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{ji})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_C G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi}{\partial n} dc = \varphi(M^0), M^0 \in S_c. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут $G_{Sp,j}(M, M^0)$ – функция источника сейсмического поля, краевая задача для которой сформулирована в работе [14]; $k_{1ji}^2 = \omega^2(\sigma_{ji}/\lambda_{ji})$ – волновое число для продольной волны, в приведенном выражении индекс ji обозначает принадлежность свойств среды внутри неоднородности, ja – вне неоднородности; λ – постоянная Ламэ; σ – плотность среды; ω – круговая частота; $\vec{u} = \text{grad} \varphi$ – вектор смещений; φ^0 – потенциал нормального

сейсмического поля в слоистой среде в отсутствие неоднородности: $\varphi_{ji}^0 = \varphi_{ja}^0$.

Идея, изложенная в предыдущем разделе относительно электромагнитного поля, реализована и для сейсмического поля – двумерного случая распространения продольной волны через локальную неоднородность с иерархической структурой, расположенную в J -м слое N -слоистой среды:

$$\begin{aligned} & \frac{(k_{1ji}^2 - k_{1j}^2)}{2\pi} \iint_{S_{cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{ji}} \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{ji})}{\sigma_{ji} 2\pi} \oint_{cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0), M^0 \in S_{cl}, \\ & \frac{\sigma_{ji} l (k_{1jil}^2 - k_{1j}^2)}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{S_{cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{ji} l)}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0), M^0 \in S_{cl}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $G_{Sp,j}(M, M^0)$ – функция источника сейсмического поля для слоистой среды, она совпадает с соответствующей функцией из выражения (3); $k_{1jil}^2 = \omega^2 (\sigma_{ji} / \lambda_{jil})$ – волновое число для продольной волны, в приведенном выражении индекс ji обозначает принадлежность свойств среды внутри неоднородности, ja – вне неоднородности, $l = 1, \dots, L$ – номер иерархического уровня, $\vec{u}_l = \text{grad} \varphi_l$, φ_l^0 – потенциал нормального сейсмического поля в слоистой среде в отсутствие неоднородности предыдущего ранга; если $l = 2, \dots, L$, то $\varphi_l^0 = \varphi_{l-1}$, если $l = 1$, то $\varphi_l^0 = \varphi^0$, что совпадает с соответствующим выражением из (3).

Если при переходе на следующий иерархический уровень ось двумерности не меняется, а изменяются только геометрии сечений вложенных структур, то аналогично (1), (2) 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 (4). Если на некотором иерархическом уровне структура локальной неоднородности распадается на несколько неоднородностей, то двойной и контурные интегралы в выражениях (4) 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 двумерной неоднородности иерархического типа в N -слоистой среде. Аналогично алгорит-

мам (4) выписывается такой же процесс для моделирования распространения упругой поперечной волны в N -слоистой среде с двумерной иерархической структурой произвольной морфологии сечения при использовании интегральных соотношений, выписанных в статье [14]:

$$\begin{aligned} & \frac{(k_{2jil}^2 - k_{2j}^2)}{2\pi} \iint_{S_{cl}} u_{xl}(M) G_{Ss,j}(M, M^0) d\tau_M + \frac{\mu_{ja}}{\mu_{jl}} u_{x(l-1)}^0(M^0) + \\ & + \frac{(\mu_{ja} - \mu_{jl})}{\mu_{jl} 2\pi} \oint_{cl} u_{xl}(M) \frac{\partial G_{Ss,j}}{\partial n} dc = u_{xl}(M^0), M^0 \in S_{cl}, \\ & \frac{\mu_{jl} (k_{2jil}^2 - k_{2j}^2)}{\mu(M^0) 2\pi} \iint_{S_{cl}} u_{xl}(M) G_{Ss,j}(M, M^0) d\tau_M + u_{x(l-1)}^0(M^0) + \\ & + \frac{(\mu_{ja} - \mu_{jl})}{\mu(M^0) 2\pi} \oint_{cl} u_{xl}(M) \frac{\partial G_{Ss,j}}{\partial n} dc = u_{xl}(M^0), M^0 \in S_{cl}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $G_{Ss,j}(M, M^0)$ – функция источника сейсмического поля рассматриваемой задачи, она совпадает с функцией Грина, выписанной в статье [14] для соответствующей задачи; $k_{2jil}^2 = \omega^2 (\sigma_{ji} / \mu_{jl})$ – 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 в отсутствие неоднородности предыдущего ранга; если $l = 2, \dots, L$, то $u_{xl}^0 = u_{x(l-1)}$, если $l = 1$, то $u_{xl}^0 = u_x^0$, что совпадает с соответствующим выражением для нормального поля в работе [14].

Таким образом, итерационные процессы (4) и (5) позволяют определить при заданных модулях упругости во вмещающей иерархическую неоднородность слоистой среде и в неоднородности пространственное распределение составляющих сейсмического поля на каждом иерархическом уровне. Затем по известным формулам работы [4] для каждого иерархического уровня можно вычислить распределение составляющих тензора деформации и тензора напряжений по распределению составляющих вектора смещений. Эта информация играет важную роль при оценке состояния среды в зависимости от структуры ее иерархичности и степени ее изменчивости.

К вопросу об обратной задаче активного электромагнитного и акустического мониторинга иерархической геологической среды. Решение обратных задач имеет огромное значение, в частности, для нефтяной промышленности, поскольку нефтяной пласт относится к природным системам, не поддающимся прямым измерениям и наблюдениям в целом. Исследования последних лет показали, что в эволюции динамических систем важную роль играют неустойчивости, природу которых изучает теория самоорганизации, или синергетика. Информацию об их проявлении в нефтяном пласте при его обработке можно получить, только ис-

пользуя данные мониторинга, чувствительные к его иерархической структуре.

В работе [12] предложена концепция поэтапной интерпретации переменного электромагнитного поля. На первом этапе определяются параметры нормального разреза или параметры вмещающей одномерной немагнитной среды аномальные проводящие, либо магнитные включения. На втором этапе осуществляется подбор аномального переменного электромагнитного поля системой сингулярных источников, помещенных в горизонтально-слоистую среду с определенными на первом этапе геоэлектрическими параметрами. На третьем этапе решается теоретическая обратная задача, т. е. при заданных геоэлектрических параметрах вмещающей среды для набора параметров неоднородности определяются контуры этой неоднородности. Получены явные интегро-дифференциальные уравнения теоретической обратной задачи рассеяния двумерного и трехмерного переменного и трехмерного стационарного электромагнитных полей в рамках моделей: проводящее либо магнитное тело в ν -м слое проводящего n -слоистого полупространства. В настоящей работе с помощью подхода, изложенного в статьях [10,11], разработан алгоритм получения уравнения теоретической обратной задачи для переменного электромагнитного (скалярный случай) и акустического (поперечной акустической волны) полей для модели проводящей или упругой иерархической неоднородности 1-го ранга, расположенной в ν -м слое проводящего либо упругого n -слоистого полупространства:

$$\begin{aligned} 2\pi U^+(M_0) = & \int_{\partial D} \left[(U_\nu^+(M) + U_\nu^{1(l-1)}(M)) \times \right. \\ & \times \left(\frac{\partial G^{al}(M, M_0)}{\partial n} - (b_\nu/b_i) \frac{\partial G(M, M_0)}{\partial n} \right) - \\ & - b_\nu \left(\frac{\partial U_\nu^+}{\partial n} + \frac{\partial U_\nu^{1(l-1)}}{\partial n} \right) \times \\ & \left. \times \left((1/b_{al}) G^{al(l-1)}(M, M_0) - (1/b_i) G(M, M_0) \right) \right] dl. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (6) является явным уравнением теоретической обратной задачи для двумерного скалярного уравнения Гельмгольца в слоистой среде с однородным включением 1-го иерархического ранга при заданных значениях граничных условий для перечисленных выше задач. В результате решения интегро-дифференциального уравнения (6) относительно функции $r_l(\varphi)$, описывающей контур искомого однородного объекта l -го иерархического ранга, удастся его определить при известных значениях физических параметров вмещающей среды и искомого объекта, а также при заданных значениях функций $U^+, G, G^{al}, U_\nu^+, U_\nu^{1(l-1)}$ и коэффициентов b_ν, b_i, b_{al} .

Рассмотрим частные случаи этого уравнения для двумерного переменного электромагнитного поля.

E-поляризация: коэффициенты $b_\nu = b_i = b_{al} = 1$;

$$\begin{aligned} 2\pi E_x^+(M_0) = & \int_{\partial D} \left[(E_{x\nu}^+(M) + E_{x\nu}^{1(l-1)}(M)) \times \right. \\ & \times \left(\frac{\partial G_E^{al}(M, M_0)}{\partial n} - \frac{\partial G_E(M, M_0)}{\partial n} \right) - \\ & \left. - \left(\frac{\partial E_{x\nu}^+}{\partial n} + \frac{\partial E_{x\nu}^{1(l-1)}}{\partial n} \right) (G_E^{al}(M, M_0) - G_E(M, M_0)) \right] dl; \end{aligned}$$

H-поляризация: коэффициенты $b_j = 1/k_j^2$; $b_\nu \neq b_i \neq b_{al}; b_{al} = 1/k_{al}^2$;

$$\begin{aligned} 2\pi H_x^+(M_0) = & \int_{\partial D} \left[(H_{x\nu}^+(M) + H_{x\nu}^{1(l-1)}(M)) \times \right. \\ & \times \left(\frac{\partial G_H^{al}(M, M_0)}{\partial n} - \left(\frac{k_i^2}{k_\nu^2} \frac{\partial G_H(M, M_0)}{\partial n} \right) \right) - \\ & \left. - \frac{1}{k_\nu^2} \left(\frac{\partial H_{x\nu}^+}{\partial n} + \frac{\partial H_{x\nu}^{1(l-1)}}{\partial n} \right) (k_{al}^2 G_H^{al}(M, M_0) - k_i^2 G_H(M, M_0)) \right] dl. \end{aligned}$$

Рассмотрим частный случай этого уравнения для 2D дифракции линейно поляризованной упругой поперечной волны (скалярный случай) в N -слоистой упругой среде с упругим включением иерархического типа.

При этом

$$b_\nu = \xi_\nu; b_i = \xi_i; b_{al} = \xi_{al};$$

где ξ_ν, ξ_i, ξ_{al} – значения упругого параметра Ламэ в ν -м слое, где находится точка M_0 , и внутри иерархической неоднородности l -го ранга соответственно;

$$\begin{aligned} 2\pi u_x^+(M_0) = & \int_{\partial D} \left[(u_{x\nu}^+(M) + u_{x\nu}^{1(l-1)}(M)) \times \right. \\ & \times \left(\frac{\partial G_{SS}^{al}(M, M_0)}{\partial n} - (\xi_\nu/\xi_i) \frac{\partial G_{SS}(M, M_0)}{\partial n} \right) - \\ & - \xi_\nu \left(\frac{\partial u_x^+}{\partial n} + \frac{\partial u_{x\nu}^{1(l-1)}}{\partial n} \right) \times \\ & \left. \times \left((1/\xi_{al}) G_{SS}^{al}(M, M_0) - (1/\xi_i) G_{SS}(M, M_0) \right) \right] dl. \end{aligned}$$

Заключение. Рассмотрена задача моделирования электромагнитного и сейсмического поля в слоистой среде с включениями иерархической структуры. Построены алгоритмы моделирования в электромагнитном случае для 3D неоднородности, в сейсмическом случае для 2D неоднородности. При использовании полученных алгоритмов представляет интерес исследование вопроса об изучении связи между тензорами напряжения и

деформации на каждом иерархическом уровне и о возможном отклонении ее от обобщенного закона Гука. Однако с увеличением степени иерархичности среды увеличивается степень пространственной нелинейности распределения составляющих сейсмического и электромагнитного полей, что предполагает исключение методов линеаризации задачи при создании методов интерпретации. Кроме того, усложняется процесс комплексирования методов, использующих электромагнитное и сейсмическое поля для изучения отклика среды с иерархической структурой. Эта проблема неразрывно связана с формулировкой и решением обратной задачи для распространения электромагнитного и сейсмического полей в таких сложных средах. В работе 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, являющиеся основой определения контуров несоосных включений l -го ранга иерархической структуры. Очевидно, что при решении обратной задачи в качестве исходных данных мониторинга необходимо использовать системы наблюдения, настроенные на исследование иерархической структуры среды. Вместе с тем при более сложной среде каждое волновое поле приносит свою информацию о ее внутренней структуре, поэтому интерпретацию сейсмического и электромагнитного полей необходимо вести раздельно, не смешивая эти базы данных.

1. *Дискретные свойства геофизической среды*: сб. науч. тр. Института физики Земли АН СССР. — М.: Наука, 1989. — 173 с.
2. *Караев Н.А. Рудная сейсморазведка* / Н.А. Караев, Г.Я. Рабинович. — М.: Геоинформмарк, 2000. — 468 с.
3. *Караев Н.А. Сейсмическая гетерогенность земной коры и проблемы интерпретации результатов региональных наблюдений в ближней зоне* // Неклассическая геофизика. — Саратов, 2000. — С. 30–32.
4. *Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости*. — М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1956. — 435 с.
5. *Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах* / Г. Николис, И. Пригожин. — М.: Мир, 1979. — 300 с.
6. *Панин В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел* / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. — Новосибирск: Наука, 1985. — 226 с.
7. *Родионов В.Н. О моделировании природных объектов в геомеханике* / В.Н. Родионов, И.А. Сизов, Г.Г. Кочарян / Дискретные свойства геофизической среды. — М.: Наука, 1989. — С. 14–18.
8. *Садовский М.А. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс* / М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко. — М.: Наука, 1987. — 98 с.
9. *300 лет горно-геологической службе России. Междунар. геофиз. конф., С.-Петербург, 3–6 окт. 2000 г.*: Тез. докл. — СПб: Изд-во ВИРГ — Рудгеофизика, ЕАГО, 2000. — 738 с.
10. *Хачай О.А. Об интерпретации двумерных переменных и трехмерных стационарных аномалий электромагнитного поля* // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1989. — № 10. — С. 50–58.
11. *Хачай О.А. О решении обратной задачи для трехмерных переменных электромагнитных полей* // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1990. — № 2. — С. 55–59.
12. *Хачай О.А. Математическое моделирование и интерпретация переменного электромагнитного поля в неоднородной коре и верхней мантии Земли*: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Свердловск: ИГФ УрО РАН, 1994. — 314 с.
13. *Хачай О.А. Об изучении нестационарных процессов в литосфере Среднего Урала* / О.А. Хачай, В.С. Дружинин, Г.И. Парыгин // Урал. геофиз. вестн. — 2002. — № 3. — С. 103–107.
14. *Хачай О.А. О комплексировании сейсмических и электромагнитных активных методов для картирования и мониторинга состояния двумерных неоднородностей в N -слойной среде* / О.А. Хачай, А.Ю. Хачай // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника. — 2011. — № 2 (219). — С. 49–56.
15. *Шемякин Е.И. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок* / Е.И. Шемякин, Г.Л. Фисенко, М.В. Курленя, В.Н. Опарин и др. // Докл. АН СССР. — 1986. — Т. 289, № 5. — С. 830–832.
16. *Шемякин Е.И. Открытие № 400. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок* / Е.И. Шемякин, М.В. Курленя, В.Н. Опарин, В.Н. Рева, Ф.П. Глушихин, М.А. Розенбаум // Бюлл. изобретений. — 1992. — № 1. — 5 с.

Поступила в редакцию 26.05.2015 г.

НОВІ МЕТОДИ ГЕОІНФОРМАТИКИ МОНІТОРИНГУ ХВИЛЬОВИХ ПОЛІВ У ІЄРАРХІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

О.О. Хачай¹, О.Ю. Хачай², А.Ю. Хачай²

¹Інститут геофізики Уральського відділення РАН, вул. Амундсена, 100, Єкатеринбург 620016, Російська Федерація, e-mail: olgakhachay@yandex.ru

²Уральський Федеральний університет, вул. Миру, 19, Єкатеринбург 620002, Російська Федерація, e-mail: andrey.khachay@gmail.com, khachay@yandex.ru

Побудовано алгоритм 3D моделювання електромагнітного поля для довільного типу джерела збудження N -шарового середовища з ієрархічним провідним включенням, розмішеним у J -му шарі. Побудовано алгоритми 2D моделювання для дифракції звуку і лінійно поляризованої поперечної пружної хвилі на включенні з ієрархічною структурою, розмішеному в J -му шарі N -шарового пружного середовища. Виписано рівняння теоретичної оберненої задачі для 2D електромагнітного поля E - і H -поляризації та лінійно поляризованої пружної хвилі під час збудження N -шарового провідного або пружного середовища з ієрархічним провідним або пружним включенням, розташованим у v -му шарі. З побудованої теорії випливає, що при інтерпретації даних моніторингу необхідно використовувати такі дані, які отримані в межах систем спостереження, настроєних на дослідження ієрархічної структури середовища. В разі складнішої побудови середовища кожне хвильове поле привносить свою інформацію про її внутрішню структуру, тому інтерпретацію сейсмічного та електромагнітного полей необхідно вести окремо, не змішуючи ці бази даних.

Ключові слова: ієрархічна середа, електромагнітне поле, сейсмічне поле, ітераційний алгоритм, рівняння теоретичної оберненої задачі.

NEW GEOINFORMATICS METHODS FOR WAVE FIELDS MONITORING IN HIERARCHIC HETEROGENEOUS MEDIA

O.A. Hachay¹, O.Yu. Khachay², A.Yu. 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. 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 as a rule occurs locally and these zones are named 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 it is necessary to develop new algorithms of modeling wave field's propagation through the local objects with hierarchical structure. It also requires a theory of interpreting the distribution of wave fields to define the contours of these local hierarchical objects.

Design/methodology/approach. We constructed an algorithm for the 3D modeling of an electromagnetic field for an arbitrary type of source of excitation in a N -layered medium with a hierarchic conductive intrusion, located in the layer number J . We also been constructed algorithms for the 2D modeling of sound diffraction and linear polarized transversal seismic wave on an intrusion of the hierarchic structure located in the layer number J of the N -layered elastic medium. We used the method of integral and integral-differential equations for a space frequency presentation of wave field's distribution. An algorithm is developed to build the equation of the theoretical inverse problem for 2-D electromagnetic field of E and H polarization and linear polarized longitudinal elastic wave by excitation of the N -layered conductive or elastic medium with hierarchic conductive or elastic inclusion located in the v -th layer.

Findings. The theory proves that for such complicated medium each wave field contains its own information about the inner structure of the hierarchical inclusion. Therefore it is important to interpret the monitoring data for each wave field apart, without mixing the data base.

Practical value/implications. These results will serve as the base for constructing new systems of monitoring observations of dynamical geological systems. It is particularly useful in preventing rock shocks in deep mines by their exploitation.

Keywords: hierarchic medium, electromagnetic field, seismic field, algorithms of modeling, equation of theoretical inverse problem.

References:

1. *Diskretnye svoystva geofizicheskoy sredy* [Discrete Features of Geophysical Medium]. *Sbornik trudov Instituta Fiziki Zemli AN USSR* [Proceedings of the Institute of Physics of the Earth of AN USSR]. Moscow, Nauka, 1989, 173 p.
2. Karaev N.A., Rabinovitch G.Ya. *Rudnaya seismorazvedka* [Ore Seismic Prospecting]. Moscow, Geoinformmark, 2000, 468 p.
3. Karaev N.A. *Seismicheskaja geterogenost' zemnoj kory i problemy interpretacii rezultatov regionalnich nabludenij v bliznei zone* [Seismic Heterogeneity of the Earth's Crust and Interpretation Problems of the Results of Regional Observations in the Nearest Zone]. *Neklassicheskaja geofizika*. Saratov, 2000, pp. 30-32.
4. Lurie A.I. *Prostranstvennye zadachi teorii uprugosti* [Space Problems of Elastic Theory]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1956, 435 p.
5. Nikolis G., Prigozin I. *Samoorganizatsija v neravnovesnykh sistemakh* [Selforganization in Nostable Systems]. Moscow, Mir, 1979, 300 p.
6. Panin V.E., Likhatchev V.A., Grinjaev Y.V. *Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural Levels of Deformation Elastic Bodies]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 226 p.
7. Rodionov V.N., Sizov I.A., Kocharjan G.G. *O modelirovanii prirodnykh objektov v geomechanike* [About Modeling of Natural Objects in Geomechanics] *Diskretnye svoystva geofizicheskoy sredy* [Discrete Features of Geophysical Medium]. Moscow, Nauka, 1989, pp. 14-18.
8. Sadovsky M.A., Bolhovitinov L.G., Pisarenko V.F. *Deformatsia geofizicheskoy sredy i seismicheskij process* [Deformation of Geophysical Medium and Seismic Process]. Moscow, Nauka, 1987, 98 p.
9. *Trista let gorno-geologicheskoy slughbe Rossii* [300-years of mining-geological service of Russia]. *Trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, S.-Peterburg, 3-6 oktjabrja, 2000* [Proceedings of the International Scientific Conference, S.-Peterburg, 3-6 october, 2000]. S.-Petersburg, VIRG-Rudgeofizika, EAGO, 2000, 738 p.
10. Hachay O.A. *Ob interpretacii dvumernih peremennykh i trehmernih stacionarnykh anomalij elektromagnitnogo polja* [About interpretation of 2-D alternating and 3-D stationary anomalies of electromagnetic field]. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*, 1989, no. 10, pp. 50-58.
11. Hachay O.A. *O reshenii obratnoy zadachi dlja trehmernykh peremennykh elektromagnitnykh poley* [About the solution of 3-D alternating electromagnetic fields]. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*, 1990, no. 2, pp. 55-59.
12. Hachay O.A. *Matematicheskoe modelirovanie i interpretatsija peremennogo elektromagnitnogo polja v neodnorodnoj kore i mantii Zemli* [Mathematical modeling and interpretation of alternating electromagnetic field in heterogeneous crust and mantle of the Earth]. Dissertation of doctor of physics and mathematics. Sverdlovsk, IGF UB RAS, 1994, 320 p.
13. Hachay O.A., Druginin V.S., Parygin G.I. *Ob izuchenii nestacionarnykh processov v lithosphere Srednego Urala* [About Research of no stationary Processes in the Lithosphere of the Middle Ural]. *Uralskij geofizicheskij vestnik*, 2002, no. 3, pp. 103-107.
14. Hachay O.A., Khachay A.Y. *O kompleksirovanii seismicheskikh i elektromagnitnykh aktivnykh metodov dlja kartirovaniya i monitoringa sostojaniya dvumernykh neodnorodnostey v N-sloinoj srede* [About Integrating Seismic and Electromagnetic Active Methods for Mapping and Monitoring of the State of 2-D Heterogeneous Objects in N-layered Medium]. *Bulletin of the South Ural State University. Series Computer technologies, control and radioelectronics*, 2011, no. 2(219), pp. 49-56.
15. Shemjakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenja M.V., Oparin V.N. *Effect zonalnoj dezintegracii gornych porod vokrug podzemnykh vyrabotok* [Effect of Zone Desintegration in Rock Massif around the Mine Holes]. *Doklady AN USSR*, 1986, vol. 289, no. 5, pp. 830-832.
16. Shemyakin E.I., Kurlenya M.V., Oparin V.N., Reva V.N., Glushikhin F.P., Rozenbaum M.A. *Otkrytie No 400. Javlenie zonalnoj dezintegratsii gornych porod vokrug podzemnykh vyrabotok* [Discovery No 400. Phenomenon of Zone Disintegration in Rock Massif around the Mines Holes]. *Bulleten izobretenij*, 1992, no. 1, 5 p.

Received 26/05/2015