УДК 550.830,
539.3

О.А. Хачай, А.Ю. Хачай

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АНОМАЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СЛОИСТО-БЛОКОВОЙ СРЕДЕ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Геологическая среда является открытой системой, на которую действуют внешние и внутренние факторы. Они приводят ее к неустойчивому состоянию, которое, как правило, проявляется локально в виде зон, называемых динамически активными элементами, которые являются индикаторами потенциальных катастрофических источников. Эти объекты отличаются от вмещающей геологической среды своими структурными формами, которые часто являются формами иерархического типа. Процесс их активизации может наблюдаться с помощью мониторинга волновых полей, для математического обеспечения которого разработаны новые алгоритмы моделирования с использованием метода интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. Разработан новый подход к интерпретации волновых полей, для определения контуров или поверхностей локально напряженных иерархических объектов. Разработан итерационный процесс решения теоретической обратной задачи для случая определения конфигураций 2D иерархических включений *k*-го ранга. При интерпретации результатов мониторинга необходимо использовать данные таких систем наблюдения, которые настроены на исследование иерархической структуры среды.

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

Введение

Важнейшим итогом геомеханико – геодинамических исследований минувшего века явилось обнаружение тесной взаимосвязи между глобальными геодинамическими и локальными геомеханическими процессами, обусловленными ведением горных работ, особенно в тектонически-активных зонах. Не менее крупным результатом исследований явилось также

ISSN 0236–1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 4. С. 354–365.

заключение 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 было выделено по геофизическим исследованиям более 30 иерархических уровней от тектонических плит протяженностью в тысячи километров до отдельных минеральных зерен миллиметрового размера [1]. 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 [2].

При построении математической модели реального объекта необходимо в качестве априорной информации использовать данные активного и пассивного мониторинга, получаемые в ходе текущей эксплуатации объекта. В работах [3, 4] построены алгоритмы моделирования в электромагнитном случае для 3-D неоднородности, в сейсмическом случае для 2-D неоднородности для произвольного типа источника возбуждения N-слойной среды с иерархическим упругим включением, расположенным в J-ом слое.

В работе [5] 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 неоднородностей 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-ом слое проводящего n-слойного полупространства.

В настоящей работе, используя подход, изложенный в работах [6, 7], разработан алгоритм получения уравнения теоретической обратной задачи для акустического поля (поперечной акустической волны) для модели упругая иерархическая неоднородность k-го ранга, плотность которой совпадает с плотностью вмещающей среды для всех иерархических рангов, расположенная в ν-ом слое упругого n-слойного полупространства.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 изложен итерационный алгоритм решения обратной задачи для 2-D дифракции линейно поляризованной упругой поперечной волны для N-слойной упругой среды с упругим включением иерархического типа на основе уравнения теоретической обратной задачи. В разделе 2 изложены результаты и выводы.

Алгоритм решения обратной задачи 2-D дифракции линейно поляризованной упругой поперечной волны для N-слойной среды с иерархическим упругим включением

Пусть односвязная область D из евклидова пространства R^2, ограниченная непрерывно дифференцируемой замкнутой кривой ∂D, расположена в ν-ом слое n-слойного полупространства. Пусть эта область содержит в себе K несоосных односвязных иерархических включений, ограниченных непрерывно дифференцируемыми замкнутыми кривыми ∂D_k и простирающиеся параллельно оси OX. Границы l_i слоев Π_j ($j = 1,\ldots, n$) параллельны оси OY плоскости XOY декартовой системы координат. Ось OZ направлена вертикально вниз. Поместим начало координат на верхнюю границу поверхности 1-го слоя и совместим его с точкой, являющейся проекцией на OY точки, относительно которой область D звездная. Пусть $U(y, z)$ –комплекснозначные дважды непрерывно дифференцируемые функции, удовлетворяющие соответственно двумерному скалярному уравнению Гельмгольца:

$$\Delta U + c(M)U = -f(M) \qquad (1),$$

где $\Delta = \dfrac{\partial^2}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial z^2}$;

$$c(M) = \begin{cases} c_j; M \in \Pi_j \setminus \overline{D}\,(j = 0,\ldots n) \\ c_{ak}; M \in D_k (k = 1,\ldots K) \end{cases} \qquad (2).$$

Пусть функция $U^1(y, z)$ удовлетворяет уравнению:

$$\Delta U^1 + p(M)U^1 = -f(M) \qquad (3)$$

$$p(M) = \begin{cases} c_j; M \in \Pi_j \setminus \overline{D}(\,j = 0,\ldots n) \\ c_\nu; M \in D_k (k = 1,\ldots K) \end{cases} \qquad (4)$$

Рассмотрим сначала случай при $k = 1$.

Для $M \in R^2 \setminus \overline{D}\left(j = 0,\ldots n\right)$ определим:

$$U^+(M) = U(M) - U^1(M) \tag{5}$$

Функция $U^+(M)$ удовлетворяет уравнению (1). На границах раздела l_j слоев Π_j выполняются граничные условия:

$$\begin{aligned} &U_j = U_{j+1};\\ &U_j^+ = U_{j+1}^+;\ M \in l_j (j = 1,\ldots,n-1);\\ &U_j^1 = U_{j+1}^1; \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{gathered} b_j \frac{\partial U_j}{\partial n} = b_{j+1} \frac{\partial U_{j+1}}{\partial n};\ b_j \frac{\partial U_j^+}{\partial n} = b_{j+1} \frac{\partial U_{j+1}^+}{\partial n};\\ b_j \frac{\partial U_j^1}{\partial n} = b_{j+1} \frac{\partial U_{j+1}^1}{\partial n};\ M \in l_j \end{gathered} \tag{7}$$

b_j комплексные коэффициенты ($j = 0,\ldots,n$) и в общем случае: $b_j \neq b_{j+1}$; на контуре ∂D_k : при $k = 1$

$$U_\nu = U_\nu^+ + U_\nu^1; \tag{8}$$

Функция удовлетворяет уравнению:

$$\Delta U_\nu + c_\nu(M) U_\nu = -f(M) \tag{9}$$

U_ν^+ – функция U^+ в слое $\Pi_\nu \notin D$; U_ν^1 – функция U^1 в слое $\Pi_\nu \notin D$;

В области D при $k = 1$

$$U_a = U_a^+ + U_a^1; M \in \overline{D}; \Delta U_a + c_a U_a = 0; \tag{10}$$

Граничные условия на ($k = 1$):

$$U_a^+ = U_\nu^+ \quad b_a \frac{\partial U_a}{\partial n} - b_\nu \left(\frac{\partial U_\nu^+}{\partial n} + \frac{\partial U_\nu^1}{\partial n}\right) = 0 \tag{11}$$

При $M \to \infty$ функции $U(M), U^+(M), U^1(M)$ удовлетворяют условию излучения [8]. Алгоритм вычисления функции U^1, например, приведен в работе [5].

Введем функцию $G(M, M_0)$, удовлетворяющую уравнению

$$\Delta G + p(M) G = -\delta(M, M_0) \tag{12}$$

и граничным условиям (6), (7), при функция удовлетворяют условию излучения [8], при функция имеет особенность типа $\ln 1 / \rho(M, M_0)$:

$$\rho(M, M_0) = \sqrt{(y - y_0)^2 + (z - z_0)}^2 \qquad (13)$$

Алгоритм вычисления функции для случая, когда область D находится в ν-ом слое приведен в работе [5]. Введем функцию G^a, которая совпадает с фундаментальным решением уравнения (2) при $k = 1$. Применим формулу Грина [8] для пары функций $U^+, G; (M \in R^2 \setminus \overline{D}, M_0 \in {}_i)$ в каждом из слоев $\Pi_j (j = 0, \ldots, n)$. Проделаем процедуру аналогично [9]: домножим полученные выражения для каждого слоя на соответственно и сложим их почленно с учетом (1)–(4), (6)–(7). В результате получим:

$$2\pi U^+(M_0) = -\left(\frac{b_\nu}{b_i}\right) \int_{\partial D} \Big(U_\nu^+(M) \frac{\partial G(M, M_0)}{\partial n} - \\ -G(M, M_0) \frac{\partial U_\nu^+}{\partial n}\Big); M \in \Pi_\nu; M_0 \in \Pi_i; \qquad (14)$$

В области D применим формулу Грина для пары функций $U_a(M), G^a(M, M_0)$. В результате получим:

$$0 = \int_{\partial D} \Big(U_a(M) \frac{\partial G^a(M, M_0)}{\partial n} - G^a(M, M_0) \frac{\partial U_a}{\partial n}\Big) dl; \qquad (15)$$

Сложим выражения (14) и (15), учитывая (10)–(11), а также соотношение [5]:

$$0 = \left(-\frac{b_\nu}{b_i}\right) \int_{\partial D} \Big(U_\nu^1(M) \frac{\partial G(M, M_0)}{\partial n} - \\ -G(M, M_0) \frac{\partial U_\nu^1}{\partial n}\Big) dl; \; M \in \overline{D}; M_0 \in \Pi_i; \qquad (16)$$

Тогда получим:

$$2\pi U^+(M_0) = \int_{\partial D} \Big(\big(U_\nu^+(M) + U_\nu^1(M)\big)\Big(\frac{\partial G^a(M, M_0)}{\partial n} - \\ -\left(\frac{b_\nu}{b_i}\right) \frac{\partial G(M, M_0)}{\partial n}\Big) - b_\nu\Big(\frac{\partial U_\nu^+}{\partial n} + \frac{\partial U_\nu^1}{\partial n}\Big)\Big(\left(\frac{1}{b_a}\right) G^a(M, M_0) - \\ -\left(\frac{1}{b_i}\right) G(M, M_0)\Big)\Big) dl; \qquad (17)$$

Уравнение (17) является явным уравнением теоретической обратной задачи для двумерного скалярного уравнения Гельмгольца в слоистой среде с однородным включением при заданных значениях граничных условий [5–7]. В результате решения интегро-дифференциального уравнения (17) относительно функции $r(\varphi)$, описывающей контур искомого однородного объекта, удается ее определить при известных значениях физических параметров вмещающей среды и искомого объекта, а также при заданных значениях функций $U^+, G, G^a, U_\nu^+, U_\nu^1$.

Согласно [3, 10] задача о дифракции линейно поляризованной упругой поперечной волны на двумерной упругой неоднородности иерархического типа, расположенной в слое n-слойной среды в рамках описанной модели сводится к решению аналогичной задачи с учетом нижеследующих изменений. Уравнение теоретической обратной задачи (17) для скалярного уравнения Гельмгольца, к которому сводится наша задача, остается в силе:

$$2\pi U^+(M_0) = \int\limits_{\partial D} ((U_\nu^+(M) + U_\nu^1(M))(\frac{\partial G^a(M,M_0)}{\partial n} -$$
$$-(b_\nu / b_i)\frac{\partial G(M,M_0)}{\partial n}) - b_\nu(\frac{\partial U_\nu^+}{\partial n} + \frac{\partial U_\nu^1}{\partial n})((1/b_a)G^a(M,M_0) - \quad (18)$$
$$-(1/b_i)G(M,M_0)))dl;$$

При этом

$$b_\nu = \xi_\nu; b_i = \xi_i; b_a = \xi_a; \quad (19)$$

$\xi_\nu, \xi_i, \xi_a, \rho_\nu, \rho_i, \rho_a$ – значения упругого параметра Ламе и плотность в -ом слое, в слое, где находится точка M0 и внутри неоднородности при $k = 1$. Важным отличием настоящей задачи от рассмотренной ранее является то, что $\rho_a = \rho_\nu$ при всех k. Физически это означает, что аномалия в акустическом поле создается аномалией напряженного состояния среды и может быть связана с очагом либо горного удара, либо землетрясений.

$$U^+ = u_x^+; U_\nu^+ = u_{x\nu}^+; U_\nu^1 = u_{x\nu}^1; \quad (20),$$

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

$$G(M,M_0) = G_{SS}(M,M_0); G^a(M,M) = G_{SS}^a(M,M_0); \partial D, dl,$$
$$k_{2a}^2 = \omega^2 \frac{\rho_\nu}{\xi_a};\ k_{2\nu}^2 = \omega^2 \frac{\rho_\nu}{\xi_\nu}; \quad (21)$$

Алгоритм вычисления функции Грина $G_{SS}(M,M_0)$ выписан в работе [11].

Таким образом, уравнение теоретической обратной задачи при $k = 1$ записывается в виде:

$$2\pi u_x^+(M_0) = \int\limits_{\partial D1} ((u_{x\nu}^+(M) + u_{x\nu}^1(M))(\frac{\partial G_{SS}^{a1}(M,M_0)}{\partial n} -$$

$$-(\xi_\nu / \xi_i)\frac{\partial G_{SS}(M,M_0)}{\partial n}) - \xi_\nu(\frac{\partial u_x^+}{\partial n} + \frac{\partial u_{x\nu}^1}{\partial n})((1/\xi_{a1})G_{SS}^{a1}(M,M_0) - \quad (22)$$

$$-(1/\xi_i)G_{SS}(M,M_0)))dl;$$

Пусть $k = 2$, т.е. искомый объект представляет собой иерархическое включение: с упругим параметром Ламе ξ_1 и плотностью ρ_ν, ∂D_1 – контур внешнего включения и с упругим параметром Ламе ξ_2, плотностью ρ_ν, ∂D_2 – контур внутреннего включения. Включения несоосные. Требуется восстановить оба контура. Для решения нашей задачи в выражении (19) $\xi_a = \xi_1$, в выражении (21):

$$\partial D = \partial D_1;\ dl = dl_1;\ G_{SS}^a = G_{SS}^{a1};\ \frac{\partial}{\partial n}(G_{SS}^a) = \frac{\partial}{\partial n}(G_{SS}^{a1});$$

$$k_{2a}^2 = k_{2a1}^2 = \omega^2 \frac{\rho_\nu}{\xi_{a1}}$$

Решив уравнение (22) относительно функции $r_1(\varphi)$, описывающей контур ∂D_1, вычисляем функции: $u_x; u_x^+; u_x^1$ по алгоритму решения прямой задачи [4] внутри и вне неоднородности, помещенной в слоистую среду, u_x^1 – компонента упругого поля в слоистой среде в отсутствии неоднородности.

$$u_x(M_0) = \frac{\xi_\nu}{\xi_a} u_x^1(M_0) + \frac{k_{2a}^2 - k_{2\nu}^2}{2\pi} \iint\limits_{S1} u_x(M) G_{SS}(M,M_0) dS_1 +$$
$$+ \frac{\xi_\nu - \xi_a}{2\pi\,\xi_a} \int\limits_{\partial D_1} u_x(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dl; M_0 \in S_1 \quad (23)$$

$$u_x(M_0) = u_x^1(M_0) + \frac{\xi_a(k_{2a}^2 - k_{2\nu}^2)}{2\pi\ \xi(\mathrm{M}_0)} \iint\limits_{S1} u_x(M) G_{SS}(M,M_0) dS_1 +$$
$$+ \frac{(\xi_\nu - \xi_a)}{2\pi\,\xi(M_0)} \int\limits_{\partial D_1} u_x(M) \frac{\partial G_{SS}}{\partial n} dl; M_0 \notin S_1 \quad (24)$$

На этом первый итерационный цикл заканчивается, и мы переходим ко второму итерационному циклу $k = 2$. Вычисленную функцию $u_x(M_0)$ (24) обозначаем как:

$$u_x^{1(k-1)}; \tag{25}$$,

в выражении (19) $\xi_a = \xi_2$, в выражении (21):

$$\partial D = \partial D_2; dl = dl_2; G_{SS}^a = G_{SS}^{a2}; \frac{\partial}{\partial n}(G_{SS}^a) = \frac{\partial}{\partial n}(G_{SS}^{a2}); k_{2a}^2 = k_{2a2}^2 = \omega^2 \frac{\rho_\nu}{\xi_{a2}}$$

Уравнение (22) переписывается в виде:

$$2\pi u_x^+(M_0) = \int_{\partial D2} ((u_{x\nu}^+(M) + u_{x\nu}^{1(k-1)}(M))(\frac{\partial G_{SS}^a(M,M_0)}{\partial n} -$$

$$-(\xi_\nu/\xi_i)\frac{\partial G_{SS}(M,M_0)}{\partial n}) - \xi_\nu(\frac{\partial u_x^+}{\partial n} + \frac{\partial u_{x\nu}^{1(k-1)}}{\partial n})((1/\xi_{a2})G_{SS}^a(M,M_0) -$$

$$-(1/\xi_i)G_{SS}(M,M_0)))dl_2; \tag{26}$$

Решаем уравнение (26) относительно функции $r_2(\varphi)$, описывающей контур ∂D_2.

Если $K = 2$, то задача считается решенной, если $k > 2$, $k = k + 1$, итерационный процесс продолжается. Мы вычисляем функции:

$$u_x^{k-1}; u_x^{+(k-1)}; \tag{27}$$

по алгоритму решения прямой задачи внутри и вне иерархической неоднородности ранга k–1, помещенной в слоистую среду (физические параметры слоистой среды остаются неизменными) [4].

$$u_x^{k-1}(M_0) = \frac{\xi_\nu}{\xi_{a(k-1)}} u_x^{1(k-2)}(M_0) +$$
$$+\frac{k_{2a(k-1)}^2 - k_{2\nu}^2}{2\pi} \iint_{S(k-1)} u_x^{k-1}(M)G_{SS}(M,M_0)dS_{(k-1)} + \tag{28}$$
$$+\frac{\xi_\nu - \xi_{a(k-1)}}{2\pi\,\xi_{a(k-1)}} \int_{\partial D(k-1)_1} u_x^{k-1}(M)\frac{\partial G_{SS}}{\partial n}dl_{k-1}; M_0 \in S_{(k-1)}$$

$$u_x^{k-1}(M_0) = u_x^{1(k-2)}(M_0) + \frac{\xi_a(k_{2a}^2 - k_{2\nu}^2)}{2\pi\ \xi(\mathrm{M}_0)} \iint_{S(k-1)} u_x^{k-1}(M)G_{SS}(M,M_0)dS_1 +$$
$$+\frac{(\xi_\nu - \xi_a)}{2\pi\,\xi(M_0)} \int_{\partial D(k-1)_1} u_x^{k-1}(M)\frac{\partial G_{SS}}{\partial n}dl_{k-1}; M_0 \notin S_{(k-1)} \tag{29}$$

Вычисленную функцию $u_x^{k-1}(M_0)$ (29) обозначаем как:

$$u_x^{1(k-1)}; \tag{30}$$,

в выражении (19) $\xi_a = \xi_k$, в выражении (21):

$$\partial D = \partial D_k; dl = dl_k; G^a_{SS} = G^{ak}_{SS}; \frac{\partial}{\partial n}(G^a_{SS}) = \frac{\partial}{\partial n}(G^{ak}_{SS}); k^2_{2a} = k^2_{2ak} = \omega^2 \frac{\rho_\nu}{\xi_{ak}}.$$

Уравнение (22) переписывается в виде:

$$2\pi u^+_x(M_0) = \int\limits_{\partial D} ((u^+_{x\nu}(M) + u^{1(k-1)}_{x\nu}(M))(\frac{\partial G^a_{SS}(M, M_0)}{\partial n} -$$

$$-(\xi_\nu / \xi_i)\frac{\partial G_{SS}(M, M_0)}{\partial n}) - \xi_\nu(\frac{\partial u^+_x}{\partial n} + \frac{\partial u^{1(k-1)}_{x\nu}}{\partial n})((1/\xi_a)G^a_{SS}(M, M_0) -$$

$$-(1/\xi_i)G_{SS}(M, M_0)))dl; \tag{31}$$

Решаем уравнение (26) относительно функции $r_k(\varphi)$, описывающей контур $\partial D \cdot k = k + 1$. Итерационный процесс (27)–(31) продолжается до $k = K$.

Заключение

В работе рассмотрена проблема построения алгоритма решения обратной задачи с использованием уравнения теоретической обратной задачи для 2-D уравнения Гельмгольца. Получено явное уравнение теоретической обратной задачи для случаев рассеяния линейно поляризованной упругой волны в слоистой упругой среде с иерархическим упругим включением, плотность которого для всех рангов равна плотности вмещающего слоя. Построен итерационный алгоритм определения контуров несоосных включений k-го ранга в иерархической структуре с последовательным использованием решения прямой задачи вычисления упругого поля k-1 ранга. С увеличением степени иерархичности структуры среды увеличивается степень пространственной нелинейности распределения составляющих сейсмического поля, что предполагает исключение методов линеаризации задачи при создании методов интерпретации. Эта проблема неразрывно связана с решением обратной задачи для распространения сейсмического поля в таких сложных средах с использованием явных уравнений теоретической обратной задачи. Впервые выписано уравнение для определения поверхности аномально напряженного включения в иерархической слоисто-блоковой среде по данным акустического мониторинга. На практике с использованием этого алгоритма мы можем по данным акустического мониторинга локализовать область возможного очага горного удара, либо готовящегося землетрясения и оценить степень аномальных упругих напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прангишвили И. В.*, *Пащенко Ф. Ф.*, *Бусыгин Б. П.* Системные законы и закономерности в электродинамике, природе и обществе. — М.: Наука, 2001. — 525 с.

2. *Кочарян Г. Г.*, *Спивак А. А.* Динамика деформирования блочных массивов. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 424 с.

3. *Хачай О. А.*, *Хачай А. Ю.* О комплексировании сейсмических и электро-магнитных активных методов для картирования и мониторинга состояния двумерных неоднородностей в N-слойной среде // Вестник ЮУРГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2011. — № 2(219). — С. 49—56.

4. *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.

5. *Хачай О. А.* Математическое моделирование и интерпретация переменного электро-магнитного поля в неоднородной коре и верхней мантии Земли. Докторская диссертация. — Свердловск: ИГФ УрО РАН, 1994. — 314 с.

6. *Хачай О. А.* Об интерпретации двумерных переменных и трехмерных стационарных аномалий электромагнитного поля // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1989. — № 10. — С. 50—58.

7. *Хачай О. А.* О решении обратной задачи для трехмерных переменных электромагнитных полей // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1990. — № 2. — С. 55—59.

8. *Стрэттон Дж.* Теория электромагнетизма. — М.-Л.: ОГИЗ, 1948. — 409 с.

9. *Дмитриев В. И.* Дифракция плоского электромагнитного поля на цилиндрических телах, расположенных в слоистых средах / Вычислительные методы и программирование. — М.: Изд-во МГУ, 1965, вып. 3. — С. 307—315.

10. *Купрадзе В. Д.* Граничные задачи теории колебаний и интегральные уравнения. — М.-Л.: Гос. Изд-во технико-теоретической литературы, 1950. — 280 с.

11. *Хачай А. Ю.* Алгоритмы для математического моделирования переменных электромагнитных и сейсмических полей в источниковом приближении. Кандидатская диссертация. — Екатеринбург: УрГУ им. А.М. Горького, 2007. —176 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хачай Ольга Александровна — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геофизики УрО РАН,
e-mail: olgakhachay@yandex.ru,
Хачай Андрей Юрьевич — кандидат физико-математических наук, доцент, Уральский федеральный университет,
e-mail: andrey.khachay@gmail.com.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 4, pp. 354–365.

UDC 550.830, 539.3

O.A. Khachay, A.Yu. Khachay

DEFINING OF THE 2-D SURFACE OF THE ANOMALY STRESSED HIERARCHICAL OBJECT LOCATED IN THE LAYERED BLOCKED GEOLOGICAL MEDIUM USING THE DATA OF ACOUSTIC MONITORING

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 activisation 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 wave fields for defining the contours of these local hierarchical objects. We developed an algorithm for constructing the equation of theoretical inverse problem for 2-D linear polarized longitudinal elastic wave by excitation of the N-layered elastic medium with hierarchic elastic inclusion located in the v –th layer with the density equal to the density of the embedded layer. An iteration process of solving the inverse problem for the case of certain configurations of hierarchical inclusions 2D k-th rank is elaborated. 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.

Key words: hierarchic medium, seismic field, algorithms of modeling, equation of theoretical inverse problem.

AUTHORS

Khachay O.A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geophysics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, Russia, e-mail: olgakhachay@yandex.ru,
Khachay A.Yu., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Ural Federal University, 620002, Ekaterinburg, Russia, e-mail: andrey.khachay@gmail.com.

REFERENCES

1. Prangishvili I. V., Pashchenko F. F., Busygin B. P. *Sistemnye zakony i zakonomernosti v elektrodinamike, prirode i obshchestve* (System laws and rules in electrodynamics, nature and society), Moscow, Nauka, 2001, 525 p.

2. Kocharyan G. G., Spivak A. A. *Dinamika deformirovaniya blochnykh massivov* Dynamics of deformation of block arrays), Moscow, Akademkniga, 2003, 424 p.

3. Khachay O. A., Khachay A. Yu. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*. 2011, no 2(219), pp. 49–56.

4. Khachay O. A., Khachay A. Yu. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika*. 2013, vol. 2, no 2, pp. 48–55.

5. Khachay O. A. *Matematicheskoe modelirovanie i interpretatsiya peremennogo elektromagnitnogo polya v neodnorodnoy kore i verkhney 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), Doctor's thesis, Sverdlovsk, IGF UrO RAN, 1994, 314 p.

6. Khachay O. A. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. 1989, no 10, pp. 50–58.

7. Khachay O. A. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. 1990, no 2, pp. 55—59.

8. Stretton Dzh. *Teoriya elektromagnetizma* (Theory of electromagnetism), Moscow-Leningrad, OGIZ, 1948, 409 p.

9. Dmitriev V. I. *Vychislitel'nye metody i programmirovanie* (Computational methods and programming, vyp. 3, issue 3), Moscow, Izd-vo MGU, 1965, pp. 307—315.

10. Kupradze V. D. *Granichnye zadachi teorii kolebaniy i integral'nye uravneniya* (Boundary problems of the theory of oscillations and integral equations), Moscow-Leningrad, Gos. izd-vo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1950, 280 p.

11. Khachay A. Yu. *Algoritmy dlya matematicheskogo modelirovaniya peremennykh elektromagnitnykh i seysmicheskikh poley v istochnikovom priblizhenii* (Algorithms for mathematical modeling of alternating electromagnetic and seismic fields), Candidate's thesis, Ekaterinburg, UrGU im. A.M. Gor'kogo, 2007, 176 p.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ВОПРОСЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Гаязов Рустам Рашитович — генеральный директор,
Знаемский Юрий Анатольевич — начальник лаборатории,
Кадысев Владимир Степанович — руководитель НТО,
Маринин Илья Алексеевич — начальник отдела экспертизы,
ООО «ЮТАР».

Статистическая информация, собранная по разным отраслям промышленности, подтверждает положение о влиянии состояния эксплуатируемой техники на рисковый фон предприятия, а также важность совместного контроля промышленной безопасности со стороны предприятия-владельца, экспертной организации и государства. В современных условиях, когда основные функции контроля оборудования выполняют предприятия совместно с экспертными организациями, особое значение приобретает экспертиза промышленной безопасности.

Ключевые слова: экспертиза промышленной безопасности (ЭПБ), управление качеством, избыточная надежность, опасное производство, оборудование, работающее под избыточным давлением, подъемные сооружения, объекты газораспределения и газопотребления, нефтехимическая промышленность, нефтеперерабатывающая промышленность, взрыв, пожар, выброс опасных веществ, разгерметизация.

SAFETY ANALYSIS OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES AND THE EFFECTIVENESS OF THE INDUSTRIAL SAFETY EXPERTISE

Gayazov R.R.[1], General Director, *Znaemskiy Yu.A.*[1], Head of Laboratory,
Kadyshev V.S.[1], Head of NTO, *Marinin I.A.*[1], Chief of Department of Examination,
[1] LLC «Utar», Russia.

Statistical information collected by different industries, confirms the provision on the impact of the status of the exploited technology to the venture background of the company, as well as the importance of joint control of industrial safety of an enterprise-owner, expert organizations and the state. In modern conditions, when the main control functions of equipment to perform enterprise together with the expert organizations are of particular importance in the examination of industrial safety.

Key words: expert examination of industrial safety (industrial safety), quality management, redundant reliability, the dangerous, the equipment operating under excess pressure, lifting facilities, gas distribution facilities and gas consumption, petrochemical industry, oil refining, explosion, fire, emission of hazardous substances, depressurization.