

УДК 550.837

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ НЕПОЛНЫХ ДАННЫХ

© 2008 М.И. Шимелевич, Е.А. Оборнев

*Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе;
e-mail: OsbornevEA@mail.ru*

В статье развивается нейросетевой метод оценки изменения во времени (мониторинга) динамических параметров геоэлектрического разреза на основе неполных магнитотеллурических данных. Под неполными данными подразумеваются результаты измерений полей, проведенных на разреженных пространственных сетях наблюдения, в частности, локализованных в определенных областях поверхности Земли. Строится приближенный обратный нейросетевой оператор специального вида, позволяющий проводить быструю инверсию данных, и отслеживать динамику отдельных параметров среды в режиме реального времени. Работа алгоритма иллюстрируется на синтетических 2D магнитотеллурических данных.

ВВЕДЕНИЕ

Геодинамические процессы могут оказывать значительное влияние на электрические свойства геологической среды (Соболев, 1993). Под воздействием механических напряжений возможны изменения как электрических свойств геологической среды (эффект 1 рода), так и изменения интенсивности генерируемых в ней электромагнитных полей (эффект 2 рода) (Светов, 1999, 2008). Эти явления составляют объективную основу для изучения протекающих в Земле геодинамических процессов с помощью электромагнитных методов и проведения ЭМ электромагнитного (ЭМ) мониторинга с целью предсказания землетрясений и других катастрофических событий природного или техногенного происхождения. При этом могут использоваться естественные магнитотеллурические (МТ) поля - МТ мониторинг (Светов и др., 1997; Спичак, 1999) и поля искусственных источников (Мороз и др., 2005; Неведрова и др., 2004).

В основе интерпретации полевых данных МТ мониторинга с целью анализа эффектов 1 рода необходим пересчет в текущем времени наблюдаемых передаточных функций МТ поля в параметры среды, т.е. возникает обратная задача инверсии данных МТ мониторинга. Для ее решения проводятся измерения на основе, как правило,

разряженных сетей наблюдения с целью отслеживания изменения во времени отдельных динамических параметров разреза. Задачи подобного типа выходят за рамки классических обратных задач электроразведки, но могут быть сформулированы в терминах теории распознавания образов, как восстановление прообраза по частичной информации о нем, и решены с привлечением методов нейросетевой (НС) технологии. Эти методы основаны на представлении обратных магнитотеллурических операторов в виде специальных аппроксимационно — интерполяционных нейросетевых конструкций (Шимелевич, Оборнев, 1999). Основное преимущество нейросетевых методов — это высокая скорость инверсии и эффективность при многократном применении в пределах одной исследуемой модели геологической среды. В связи с этим, а также с учетом высокой чувствительности геоэлектрических параметров к изменениям геодинамической обстановки в зонах нестабильности, можно ожидать, что нейросетевой подход окажется эффективным при решении задач МТ мониторинга для изучения эффектов 1 рода. В настоящей работе рассматриваются задачи двух типов:

1) выявление и локализация динамических параметров разреза, на основе полных МТ данных, измеренных по всему профилю,

2) отслеживание изменения во времени отдельных динамических параметров среды на основе локальной сети наблюдения.

ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА ЗАДАЧИ МТ МОНИТОРИНГА

Рассмотрим область

$$\Omega : \{0 \leq z \leq H; x_1 \leq x \leq x_2; y_1 \leq y \leq y_2\}.$$

На границе области

$$C_0 : \{z = 0, x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2\},$$

совпадающей с поверхностью Земли, в M точках заданы значения характеристик наблюдаемого МТ поля (например, импедансы поля на определенной сетке частот) в виде вектора данных $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_M)$. На этой основе, для области Ω может быть решена задача инверсии наблюдаемых данных нейросетевым (или каким либо иным) методом, и построен геоэлектрический разрез, характеризуемый вектором макропараметров среды $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_N)$ (Шимелевич и др., 2003). Для этого конструируется обратный нейросетевой оператор S , связывающий вектора γ, β следующими соотношениями:

$$\gamma = S(\beta), \tag{1}$$

$$\|A\gamma - \beta\| = \Delta\beta, \tag{2}$$

где: $\|\cdot\|$ - норма в пространстве наблюдаемых данных, A - оператор прямой МТ задачи для изучаемой области Ω , $\Delta\beta$ - расчетная невязка поля, которая должна быть сопоставима с уровнем погрешности данных.

Вычисляемые в процессе НС инверсии макропараметры $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_N)$ являются укрупненными характеристиками среды, на основе которых определяется распределение электропроводности среды $\sigma(x, y, z)$ во всех точках области Ω , с помощью функции параметризации $f(\gamma_1, \dots, \gamma_N, x, y, z)$, используемой в нейросетевом алгоритме для заданного модельного класса разрезов (Шимелевич, Оборнев, 1999):

$$\sigma(x, y, z) = f(\gamma_1, \dots, \gamma_N, x, y, z), \quad x, y, z \in \Omega \tag{3}$$

Рассмотрим нейросетевую постановку задачи МТ мониторинга макропараметров геоэлектрического разреза (Оборнев, 2007; Шимелевич, Оборнев, 2005; Shimelevich et al. 2007). Будем полагать, что инверсия проведена, и вектор макропараметров исследуемого разреза

$\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_N)$ вычислен.

Для этого разреза определим:

1. Вектор фиксированных макропараметров разреза $\gamma^F = (\gamma_1^F, \dots, \gamma_{N_F}^F)$, $N_F < N$

2. Вектор динамических макропараметров $\gamma^D = (\gamma_1^D, \dots, \gamma_{N_D}^D)$, $N_D < N$, $N_D + N_F = N$, которые, по предположению, могут меняться под воздействием геодинамических процессов,

3. Вектор наблюдаемых на поверхности Земли МТ данных $\beta^D = (\beta_1^D, \dots, \beta_{M_D}^D)$, измеренных в точках $r_i^D, i = 1, \dots, M_D \leq M$ области C_D , в которых предполагается проводить режимные наблюдения.

Требуется построить НС оператор $S^D : \beta^D \xrightarrow{S^D} \gamma^D$, позволяющий вычислить динамические параметры на основе вектора данных β^D :

$$\gamma^D = S_k^D(\beta^D) \tag{4}$$

Если под влиянием динамических процессов, изменения, наблюдаемых во времени МТ данных в точках r_i^D будут превышать уровень расчетной невязки поля $\Delta\beta$ в (2), то в соответствии с (4) будут изменяться значения динамических параметров среды. Таким образом, с учетом высокой скорости НС инверсии, выражение (4) определяет формулу мониторинга параметров среды в режиме реального времени:

$$\gamma^D(t_j) = S^D(\beta^D(t_j)); \quad j = 1, 2, \dots \tag{5}$$

Нейросетевой оператор S^D представляет собой нелинейную аппроксимационную конструкцию определенного вида, коэффициенты которой вычисляются в процессе ее обучения на эталонных примерах. Для этого строится База данных \mathfrak{R} эталонных примеров решений прямых задач в области Ω , состоящая из P пар векторов $\{\gamma_p^D, \beta_p^D\}, p = 1, \dots, P$, связанных соотношением:

$$A(\gamma_p^F, \gamma_p^D) = \beta_p^D, \quad \gamma_p^D \in \Gamma^D; \quad p = 1, \dots, P \tag{6}$$

при различных значениях динамических параметров, изменяющихся в пределах заданного множества допустимых значений Γ^D . Множество Γ^D выбирается на основе принятой гипотезы о предполагаемом динамическом воздействии на геологическую среду, и обычно представляет собой набор интервалов:

$$\min(\gamma_n^D) \leq \gamma_n^D \leq \max(\gamma_n^D), \quad n = 1, 2, \dots, N_D \tag{7}$$

База данных \mathfrak{R} делится на тренировочную \mathfrak{R}^{trn} и тестирующую \mathfrak{R}^{tst} , с объемами выборок P^{trn}, P^{tst} соответственно. Первая используется для обучения НС оператора S^D , а вторая — для его тестирования, т.е. проверки точности НС инверсии.

Алгоритм обучения НС оператора S^D сводится к оптимизационной проблеме, которая решается с использованием стандартных алгоритмов «Обратного распространения ошибки» (Горбань и др., 1998). На основе тестирующей выборки \mathfrak{R}^{tst} вычисляются, осредненные по выборке, характеристики обратного оператора S^D : эталонные ошибки инверсии по каждому из параметров $\delta_n^\vartheta, n = 1, \dots, N_D$ и эталонная невязка синтезированного поля $\Delta\beta^\vartheta$. Эти величины характеризуют, в среднем, возможную ожидаемую ошибку НС инверсии измеренных данных, и таким образом обосновывают правомочность использования построенного нейросетевого оператора S^D для рассматриваемой задачи.

Факт регистрации динамики параметров среды может быть достоверно установлен только в случае, если их изменения будут превышать уровень средних эталонных ошибок инверсии по параметрам δ_n^ϑ . Решение $\gamma^D(t_j)$, полученное в соответствии с (5), по данным, измеренным на момент времени t_j , сравнивается со значением $\gamma^D(t_0)$ на момент времени (t_0) и вычисляется разность:

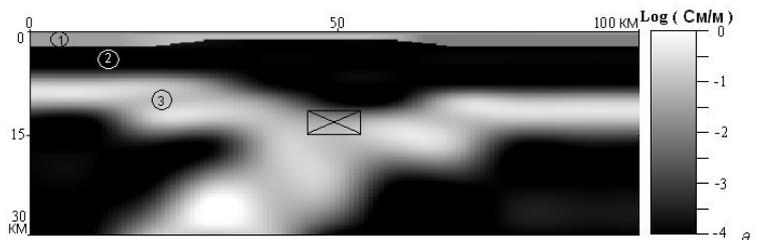
$$S^D(\beta^D(t_j)) - S^D(\beta^D(t_0)) = \Delta\gamma(t_j) \quad (8)$$

Если значение разности, вычисленное на некоторый момент времени будет удовлетворять условию:

$$\Delta\gamma_n(t_j) > \delta_n^\vartheta, \text{ хотя бы для некоторых } n \in \overline{1, N_D}, \quad (9)$$

то это означает, что на момент времени t_j с разрезом произошли объективные изменения.

Рис. 1 а. Модель SM 1 для расчета тестовых синтетических МТ данных, схематически отражающая зону субдукции. Зачеркнутым прямоугольником показано место расположения варьируемого параметра γ_{46}^D . Цифрами в кружках обозначены слои.



В итоге общая методология мониторинга параметров геоэлектрических разрезов выглядит следующим образом:

1. Проведение МТ съемки и интерпретации полученных данных с определением макропараметров геоэлектрического разреза $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_N)$.

2. Выявление и локализация аномальных зон изменения свойств разреза в процессе режимных наблюдений на основе полных площадных данных.

3. Формирование локальной сети наблюдения в окрестности аномальных зон, и построение локального обратного нейросетевого оператора мониторинга S^D .

4. Проведение режимных измерений и анализ динамики изменения макропараметров в режиме реального времени по формулам (5), (8), (9).

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для расчета синтетических МТ данных использовался модельный 2D геоэлектрический разрез (рис. 1а), схематически отражающий зону субдукции по аналогии с работами (Кокс, Хард, 1989; Сорохтин, 1974). Значения параметров для модели были взяты на основе обобщения литературных данных (Мороз, Гонтовая, 2001; Mogi, Takada, 2004). Модельный разрез построен с помощью функции параметризации типа макросетки проводимостей, изображенной на рис. 1б (Оборнев, 2007; Шимелевич, Оборнев 2007).

Размеры исследуемой области Ω составляют 100 км по профилю и 30 км в глубину. Модель включает три слоя переменной мощности и подстилающее основание. Мощность верхнего слоя меняется в горизонтальном направлении от 1 до 3 км. Слой неоднороден по проводимости в горизонтальном направлении. Это отражается в изменении удельной электропроводности $\sigma^{(1)}$ в пределах от 0.1 до 0.001 См/м. Второй слой однороден по удельной электропроводности $\sigma^{(2)}=0.0001$ См/м. Мощность второго слоя меняется от 5 до 13 км. За счет использования гладких процедур в функции параметризации, границы между слоями плавные. Мощность третьего слоя варьирует в пределах от 4 до 8 км, а удельная электропроводность $\sigma^{(3)}$ изменяется от 0.2 до 0.02 См/м. Удельная электропроводность основа-

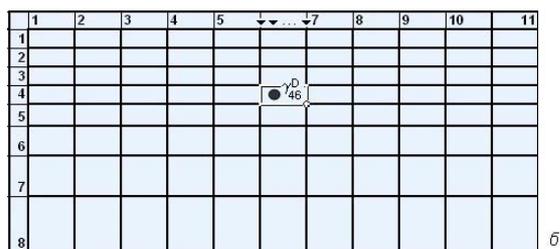


Рис. 1 б. Схема параметризации модельного разреза в виде макросетки проводимостей, галочками отмечен участок расположения локальной сети на профиле, включающей 11 точек наблюдения.

ния подстилающего третий слой постоянна и равна $\sigma^{(4)}=0.0001$ См/м.

Модель процесса динамики свойств разреза основывалась на гипотезе об изменении электропроводности трещиноватых горных пород в зонах нестабильности (проявлений деформаций). Согласно этой гипотезе, при заполнении трещин минерализованными флюидами, удельная электропроводность породы может увеличиваться, а при закрывании трещин и выдавливании флюидов - уменьшаться (Вахромеев, Давыденко, 1987; Соболев, 1983).

Для моделирования динамики свойств разреза был выбран макропараметр разреза γ_{46}^D , находящийся в области сочленения правого и левого крыла зоны субдукции, и обозначенный на рис. 1 а зачеркнутым прямоугольником. Посредством варьирования параметра моделировалось изменение электропроводности области, под воздействием процессов деформации. Для пяти различных значений макропараметра γ_{46}^D , и неизменных остальных параметрах разреза, были рассчитаны синтетические МТ поля на поверхности Земли (табл.). В 126 точках профиля длиной 100 км по равномерной сети наблюдений с шагом 800 м на сетке 13 периодов с логарифмическим шагом в пределах от 0.01 до 1000 км вычислялись значения кажущихся сопротивлений и фаз для двух поляризаций. Для расчета полей использовалась программа решения прямой 2D задачи МТ-Geos (Шимелевич и др., 1999).

Для решения задачи пространственной локализации динамического параметра γ_{46}^D , к полученным синтетическим данным применялся НС оператор S_{126}^D , предназначенный для инверсии в модельном классе 3-х слойных 2D неоднородных сред на основе данных, измеренных по всему профилю в 126 точках. По результатам инверсии вычислялись разностные (относительно опорной модели) распределения электропроводностей. На рис. 2 представлен пример распределения расчетной

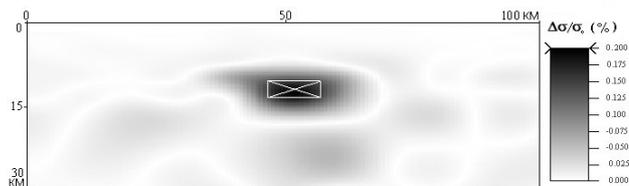


Рис. 2. Разностная карта распределения удельной электропроводности для случая изменения динамического параметра на 20% от опорного значения (эксперимент 1), полученная на основе инверсии по полному профилю (126 точек). Зачеркнутым прямоугольником показана область изменения электропроводности среды, характеризующая динамическим макропараметром γ_{46}^D . $\Delta\sigma/\sigma_0$ - отношение изменения удельной электропроводности исследуемого параметра к его значению в начальный момент времени t_0 .

разностной электропроводности разреза, соответствующий значению макропараметра 0.12 См/м (эксперимент 1) из таблицы. На рисунке показано, что аномальная зона, соответствующая местоположению измененного параметра γ_{46}^D , графически уверенно диагностируется в виде темного пятна на рисунке. Аналогичным образом аномальная зона диагностируется при остальных значениях динамического параметра, приведенных в таблице.

Для выявленной аномальной зоны изменения электропроводности среды может быть поставлена задача мониторинга на основе локальной сети наблюдений. На поверхности Земли по профилю было выбрано 11 (на порядок меньше числа точек полного профиля) точек непосредственно над областью изменения электропроводности (рис. 1б). Для этих точек был сформирован новый вектор неполных МТ данных $\beta_{11}^D = (\beta_1^D, \dots, \beta_{11}^D)$ и на его основании был построен НС оператор S_{11}^D , который позволяет проводить инверсию наблюдаемых данных в рассматриваемом модельном классе по 11 точкам профиля, и таким образом, осуществлять мониторинг зоны изменения электропроводности на основе локальной сети наблюдения.

В таблице приведены результаты расчета изменения макропараметра γ_{46}^D с помощью операторов S_{126}^D и S_{11}^D . Относительные истинные и расчетные изменения динамического параметра определялись по формуле:

$$\Delta\gamma_l^D = \frac{(\gamma_l^D - \gamma_0^D)}{\gamma_0^D}, \quad l = 1, \dots, 5$$

Таблица. Результаты расчета динамического параметра γ_{46}^D . Во второй колонке приведены истинные значения варьируемого параметра, жирным (3 строка) выделено опорное значение параметра $\gamma_0^D = 0.1$ См/м.

Порядковый номер эксперимента	Истинное значение γ_{46}^D (См/м)	Относительные изменения $\Delta\gamma_{46}^D$ параметра γ_{46}^D		
		Истинные	Рассчитанные по 126 точкам	Рассчитанные по 11 точкам
1	0.12	0.2	0.16	0.18
2	0.11	0.1	0.09	0.09
3	0.1	0.0	0.00	0.00
4	0.09	-0.1	-0.10	-0.11
5	0.08	-0.2	-0.22	-0.13

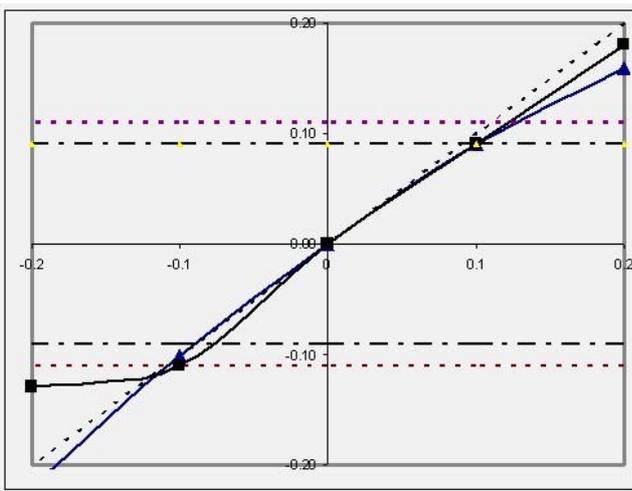


Рис. 3. Графики расчетного относительного изменения параметра γ_{46}^D , построенные в соответствии с табличными данными. Сплошная линия с треугольными маркерами отражает результат инверсии по полному профилю, сплошная линия с квадратными маркерами обозначает результат по неполным данным. Диагональная пунктирная кривая обозначает истинные модельные изменения параметров. Горизонтальными пунктирной и штрихпунктирной линиями показаны уровни значимости, соответствующие эталонным значениям ошибок инверсии параметра γ_{46}^D для операторов S_{11}^D ($\delta_{46}^{\exists,11} = 11\%$) и S_{126}^D ($\delta_{46}^{\exists,126} = 9\%$).

где: $\gamma_0^D = 0.1$ См/м - электропроводность динамического параметра γ_{46}^D в опорной модели, $\gamma_l^D, l = 1, \dots, 5$ - текущие значения динамического параметра γ_{46}^D для различных экспериментов.

Полученные данные показывают удовлетворительное совпадение результатов мониторинга на основе полных (126 точек) и неполных (11 точек) данных.

Рис. 3 иллюстрирует выполнение условия значимости изменения расчетной величины

динамического параметра, определяемого неравенством (9). При достижении величины относительного изменения параметра уровней значимости можно уверенно говорить о наступлении геодинамического события.

ВЫВОДЫ

Предлагаемый нейросетевой подход позволяет решать задачи выявления и оценки изменения во времени укрупненных динамических параметров геоэлектрических разрезов при проведении МТ мониторинга 1 рода.

Задача решается в два этапа. На первом этапе проводится локализация аномальной области изменения электропроводности среды на основе всех имеющихся наблюдаемых площадных (профильных) МТ данных. На втором этапе решается собственно задача МТ мониторинга параметров разреза на основе локальных режимных наблюдений в аномальных зонах неустойчивости. Периодически повторяемая инверсия данных в режиме реального времени позволяет уверенно, для рассматриваемого модельного класса разрезов, регистрировать изменения макропараметров разреза величиной порядка 10%.

Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ № 06-05-65299.

Список литературы

- Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л., Миркес Е.М. Нейроинформатика. Новосибирск: Наука, 1998. 296 с.
- Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике М.: Недра, 1987. 192 с.
- Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. М.: Мир, 1989. 427 с.
- Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение Южной Камчатки по геофизическим данным // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. 428 с.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Мандельбаум М.М. и др. Мониторинг электромагнитного поля Земли в районе озера Байкал // Мат. конф. "Активный геофизический мониторинг литосферы Земли". Новосибирск, 2005. С. 124-128.
- Неведрова Н.Н., Энов М.И., Дашевский Ю.А. Определение структуры массива горных пород и результаты активного электромагнитного мониторинга на Байкальском прогностическом полигоне // Геомеханика, ФТПРПИ СО РАН. № 3. 2004. С. 29-44.
- Оборнев Е.А. Инверсия двумерных магнитотеллурических данных на основе нейро-

- сетевой аппроксимации. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: РГГРУ, 2007. 30 с.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясения. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Светов Б.С.* Геоэлектромагнитные исследования по грантам РФФИ // Вестник РФФИ, 1999. № 2. С. 45-50.
- Светов Б.С.* Основы геоэлектрики. М.: ЛКИ, 2008. 658 с.
- Светов Б.С., Каринский С.Д., Кукса Ю.И., Одинцов В.И.* Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов // Изв. РАН. Физика Земли. 1997. № 5. С. 36-46.
- Сорохтин О.Г.* Глобальная эволюция Земли, М.: Наука, 1974. 183 с.
- Спичак В.В.* Магнитотеллурические поля в трехмерных моделях геоэлектрики. М.: Научный мир, 1999. 203 с.
- Шимелевич М.И., Оборнев Е.А.* Применение метода нейронных сетей для аппроксимации обратных операторов в задачах электромагнитных зондирований // Изв. вузов. Геология и разведка. 1999. № 2. С. 102-106.
- Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., Гаврюшов С.А.* Применение нейросетевой аппроксимации для решения задач мониторинга параметров геоэлектрических разрезов // Изв. вузов: Геология и разведка. 2003. № 4. С. 70-71.
- Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., Гаврюшов С.А.* Быстрая нейросетевая инверсия 2D МТ данных для мониторинга сложных геоэлектрических разрезов // Взаимосвязь между тектоникой, сейсмичностью, магмообразованием и извержениями вулканов в вулканических дугах. Материалы IV международного совещания по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский. 21-27 августа 2004 г. / Отв. ред. Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВИС ДВО РАН, 2004. С. 174-176.
- Шимелевич М.И., Оборнев Е.А.* Применение нейросетевой аппроксимации для решения задач мониторинга параметров геоэлектрического разреза // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли. Материалы II Международного симпозиума 12.09–16.09, 2005 г. Новосибирск: Академгородок, 2005. С. 121-123.
- Шимелевич М.И., Оборнев Е.А.* Нейросетевая инверсия МТ данных в классах параметризованных геоэлектрических разрезов // Физика Земли. 2007. № 3. С. 25-30.
- Mogi T. Takada M.* Resistivity Change Observed at Erimo Area Associated with 2003 Tokachioki Earthquake -3D Model Study-// Proceedings of IV International Workshop on Magnetic, Electric and Electromagnetic Methods in Seismology and Volcanology (MEEMSV-2004), September 5-9, France. 2004. P. 71-72.
- Shimelevich, M.I., Osborne, E.A., Gavryushov, S.A.* Rapid neuronet inversion of 2D magnetotelluric data for monitoring of geoelectrical section parameters // Annals of Geophysics, 2007. V. 50. № 1. P. 105-109.

NEURONET METHOD OF MAGNETOTELLURIC MONITORING OF GEOELECTRICAL SECTIONS PARAMETERS ON THE BASE OF INCOMPLETE DATA

M.I. Shimelevich, E.A. Osborne

Russia State Geo Prospecting University; e-mail: OsborneEA@mail.ru

The neuronet (NN) method of estimation of time changes (monitoring) of dynamic geoelectrical section parameters on the base of incomplete magnetotelluric data is developed. Incomplete data are the results of measurements of the electromagnetic fields, carried out on the base of rarefied spatial observation networks, in particular, localized in fixed domains of the ground surface. Constructed NN inverse operators of special type allow to make fast inversion of data and to observe the changes of fixed parameters of media in a mode of real time. Work of algorithm is illustrated on synthetic 2D magnetotellurics data.