О1 СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

П.Н. Александров*, О.Б. Забинякова**
*(*ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Троицк, **НС РАН, Бишкек)*

A SYSTEMATIC APPROACH TO THE ANALYSIS OF GEOPHYSICAL MONITORING DATA OF MODERN GEODYNAMIC PROCESSES

P.N. Alexandrov*, O.B. Zabinyakova**
*(*GEMRC IPE RAS, Troitsk, **RS RAS, Bishkek)*

Аннотация. В настоящее время активно развиваются методы геофизического мониторинга современных геодинамических процессов как естественного, так и техногенного происхождения. Однако использование методов разведочной геофизики, включающих систему наблюдения, аппаратуру и обработку данных, для решения задач мониторинга может привести к неверным выводам.

Предложен новый подход к обработке данных геофизического мониторинга, основанного на системном анализе временных рядов, вводится вектор современных геодинамических процессов, анализируется его информативность. На примере электрометрического мониторинга проведена обработка данных по предложенному подходу.

Absract. Currently actively developing methods of geophysical monitoring of modern geodynamic processes, both natural and anthropogenic origin. However, using the methods of exploration Geophysics, including monitoring equipment and data processing for monitoring objectives may lead to wrong conclusions. A new approach to data processing geophysical monitoring based on system analysis of time series, we introduce the vector of modern geodynamic processes, examines its information content. For example, resistivity monitoring carried out data processing according to the proposed approach.

Объектом исследования геофизического мониторинга современных геодинамических процессов являются любые изменения в геологической среде (естественного или техногенного характера), происходящие в настоящее время и отражающиеся в физических полях и физических параметрах горной породы, в частности, электромагнитных. Целью электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов является изучение изменений в геологической среде, их оценка и прогноз развития. Не исследуя физико-геологическое обоснование электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов, рассмотрим его как динамическую систему.

Системный анализ временных рядов. Из формальных соображений (как это будет следовать из ниже изложенного), а также из смысловых, получить новую качественную информацию можно, используя независимую информацию, поскольку в противном случае, непосредственно связанные, коррелируемые процессы не приводят к получению качественно новой информации. Иначе говоря, необходимо использовать те временные ряды, которые зависят не непосредственно, а зависят опосредовано, через параметры системы. Мерой линейной независимости (или зависимости) двух функций времени является коэффициент корреляции. Действительно, пусть даны две функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$, времени $t \in a,b$. Построим функционал невязки в метрике L^2 (метод наименьших квадратов):

$$\int_a^b (f_1(t) - kf_2(t))^2 dt = \delta$$

Минимизируя его, получим

$$\frac{\partial}{\partial k}\delta = 2\int_a^b (f_1(t) - kf_2(t)) f_2(t)dt = 2\left(\int_a^b f_1(t) f_2(t)dt - k\int_a^b f_2(t) f_2(t)dt\right) = 0$$

откуда $k = \dfrac{\int_a^b f_1(t) f_2(t)dt}{\int_a^b f_2(t) f_2(t)dt}$ - есть нормированный коэффициент корреляции.

Следовательно, оценить величину линейной независимости или зависимости можно, используя данную величину.

В связи с этим найдем матрицу коэффициентов корреляции $K = \{k_{ij}\}$ по наблюденным данным, где $k_{ij} = \dfrac{\int_a^b f_i(t) f_j(t)dt}{\int_a^b f_j(t) f_j(t)dt}$, $i = \{1:N\}$, $j = \{1:N\}$, N - количество точек наблюдения.

Матрица K - симметричная, ее можно представить в виде $K = v[\lambda]v^{-1}$, где v - матрица, составленная из собственных векторов матрицы K, $[\lambda]$ - диагональная матрица собственных значений матрицы K.

Выделим из этой матрицы матрицу с минимальной корреляцией. Для этого представим ее собственные значения $[\lambda] = \begin{bmatrix} [\lambda_+] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix}$, где $[\lambda_+]$ - диагональная матрица с большими, по модулю, величинами собственных значений матрицы K, $[\lambda_-]$ - диагональная матрица с малыми, по модулю, величинами собственных значений матрицы K, например, не превышающих по абсолютной величине $0.1\max(|\lambda|)$, $[0]$ - нулевая матрица соответствующей размерности.

Тогда матрица K_N с некоррелированными функциями времени можно найти из

$$K_N = v\begin{bmatrix} 0\cdot[\lambda_+] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix} v^{-1} = v\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix} v^{-1}$$

В результате этой операции можно выделить функции времени $f_i(t)$, которые обладают наименьшей коррелированностью и, следовательно, наименьшей линейной зависимостью друг от друга. Для этого просуммируем по столбцам модули элементов матрицы K_N и выберем некоторое количество минимальных значений полученного ряда. Их номера будут соответствовать номерам функции $f_i(t)$. В результате этой процедуры будут отобраны такие функции времени (соответствующие пространственным точкам наблюдения), которые являются максимально независимыми. Это необходимо для построения математической модели системного анализа временных рядов - динамической задачи.

Таким образом, в результате такого отбора функций времени устанавливаются области, где развиваются геодинамические процессы и в дальнейшем можно следить только за этими областями, что важно при разработке полевых систем наблюдения.

Динамическая задача. После того, как отобраны функции $f_i(t)$ (пусть они образуют количество m), их можно свести в вектор-функцию времени $\mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \cdots \\ f_m(t) \end{pmatrix}$. Рассмотрим интервал времени Δt, в пределах которого система изменяется слабо, поскольку рассматриваются медленные процессы (это можно трактовать и по другому - шаг по времени выбирается из условия быстроты изменений геодинамических процессов, что имеет практически важное значение при мониторинге). Тогда можно предположить, что в близких моментах времени существует линейная связь

$$\mathbf{X}(t+\Delta t) = A\mathbf{X}(t) = ([1]+\Delta t B)\mathbf{X}(t), \qquad (1)$$

где B - матрица, характеризующая изучаемую систему, $[1]$ - единичная матрица соответствующей размерности.

Формальным описанием динамической системы является матрица B. Предполагается, что она за некоторый интервал времени ΔT (включающий измерения во времени с шагом Δt) не меняется, в то время как вектор $\mathbf{X}$

может меняться достаточно произвольно. В выражении (1) вектор $\mathbf{X}(t)$ есть воздействие на систему, вектор $\mathbf{X}(t+\Delta t)$ результат воздействия на систему. Они могут меняться достаточно произвольным образом. Однако матрица B, описывающая систему, не меняется в интервале времени ΔT. Она полностью описывает внутренне структуру, состояние и свойства геодинамической системы.

Изменение системы во времени будет определяться изменением матрицы B. В этом случае за все время наблюдения геодинамических процессов, которое будет иметь другой масштаб времени t, более широкий, чем шаг дискретизации (измерений), матрица B будет функцией времени $B = B(t)$. Эти формально описываемые изменения динамических систем являются предметом исследования при системном анализе современных геодинамических процессов как по электроразведочным данным, так и по другим геофизическим методам.

Основной целью проведенных исследований является нахождение матрицы B и ее анализ.

Нахождение матрицы B. Нахождение этой матрицы фактически является нахождением решения обратной задачи (восстановление коэффициентов дифференциальных уравнений). Поэтому этот этап можно рассматривать как решение обратной задачи электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов.

Для нахождения матрицы B представим систему уравнений в виде

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(t) = \mathbf{X}(t+\Delta t) - \mathbf{X}(t) = B\Delta t\mathbf{X}(t).$$

Перейдем к дискретным представлениям. Иначе говоря, перейдем от функций времени к временным рядам. Пусть известны вектора $\mathbf{Y}(t_j)$ и $\mathbf{X}(t_j)$ в момент времени t_j. Введем составные матрицы

$Y = [\mathbf{Y}(t_1), \mathbf{Y}(t_2), ..., \mathbf{Y}(t_n)]$,

$X = [\Delta t_1\mathbf{X}(t_1), \Delta t_2\mathbf{X}(t_2), ..., \Delta t_n\mathbf{X}(t_n)]$,

$n >> m$,

Δt_j, $j = \overline{1,n}$ - интервалы времени, через которые были проведены измерения и которые могут быть различными, n - количество измерений. Интервал времени $t_n - t_1 = \Delta T_n$ - кадр, интервал времени, в течение которого произведено n измерений. Тогда векторная система уравнений сведется к матричной системе уравнений относительно матрицы B вида

$$Y = BX, \tag{2}$$

из которой можно найти матрицу B.

Полученная матричная система уравнений является переопределенной. В силу этого решение будет иметь вид

$$B = ((XX^T)^{-1}(XY^T))^T = VDV^{-1},$$

где ^{T} - знак операции транспонирования матрицы, V - матрица, составленная из собственных векторов матрицы B, $[D]$ - диагональная матрица собственных значений матрицы B.

Необходимо, чтобы матричная система уравнений (2) была переопределенной, поскольку это позволит оценить точность построенной математической модели согласно оценке $O = \|Y - BX\|$. В противном случае, например, при нормально определенной системе матричных уравнений, оценить точность построенной модели не представляется возможным, поскольку всегда оценка O будет равна нулю $O = 0$.

Найденная матрица позволяет осуществить прогноз развития геодинамического процесса на последующий момент времени t_{n+1} согласно выражению, вытекающему из (1)

$$\mathbf{X}(t_{n+1}) = [1] + (t_{n+1} - t_n)B \ \mathbf{X}(t).$$

Если в момент времени t_{n+1} известен вектор $\tilde{\mathbf{X}}(t_{n+1})$, то можно определить отклонение прогнозных значений от фактических $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}(t_{n+1}) - \tilde{\mathbf{X}}(t_{n+1})$. Если изменения $\Delta\mathbf{X}$ в разных точках пространства происходят синхронно, то это означает, что в данный момент происходит изменение всей системы. В противном случае, изменение системы не происходит и они связаны с другими факторами, такими, например, как помехи.

Далее сдвинув все данные на шаг дискретизации, сдвинув кадр на одно измерение, интервал времени которого будет $\Delta T_{n+1} = t_{n+1} - t_2$, и, проведя всю описанную выше процедуру нахождения матрицы B, получим временной ряд отклонений прогнозных значений от фактических по всем оставшимся временным рядам.

Если изменения происходят синхронно, то это означает, что система меняется во времени - имеет место геодинамический процесс.

Вектор геодинамических процессов. Введем понятие вектора геодинамических процессов. Известно, что сила - векторная величина, которая характеризуется модулем (величина этой силы) и направлением (направление действия этой силы). Аналогично для матрицы B: собственные значения - величины, характеризующие мощность геодинамического процесса, собственные вектора - направление действия геодинамического процесса. Векторную величину $\mathbf{G} = \sum_{i=1}^{m} d_i \mathbf{V}_i$ назовем вектором современных геодинамических процессов в момент времени t, полученный за предыдущий интервал времени наблюдений ΔT (используя ретроспективные данные), где d_i - собственное значение и соответствующий ему собственный вектор $\mathbf{V}_i$ матрицы B. ΔT - есть интервал времени вычисления матрицы B, которая приписывается времени t, - времени современного геодинамического процесса. Он смещается каждый раз, когда производятся измерения в последующие моменты времени и остается постоянным. Фактически это означает, что ΔT есть скользящий интервал времени.

Вектор современных геодинамических процессов является суммой отдельных векторов геодинамических процессов. Отдельный вектор геодинамических процессов определяется направлением (собственный вектор единичной длины) и величиной - соответствующим собственным значением. Его длина есть модуль собственного значения. Соответственно, вектор современных геодинамических процессов будет характеризовать величину этого процесса (его энергетику) в целом, и их направленность, как сумму отдельных геодинамических процессов.

Если ввести вектор $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{pmatrix}$, составленный из собственных значений матрицы B, то вектор современных геодинамических процессов можно представить в виде $\mathbf{G} = V\mathbf{D}$.

В силу измерений в конечные интервалы времени следует рассматривать относительные величины. Для двух векторов, полученных в моменты времени t_j и t_{j-1}, изменение во времени геодинамических процессов опишем как скалярное произведение двух векторов $\mathbf{G}_j \mathbf{G}_{j-1} = |\mathbf{G}_j||\mathbf{G}_{j-1}| Cos(\Delta\varphi_j)$. Основание введения этой операции заключается в том, что вектор $\mathbf{G}$ - многомерный вектор, представить который в многомерном пространстве не возможно. Однако проанализировать его изменение во времени, руководствуясь по аналогии двух/трехмерным пространством и понять, возможно. Для этого необходимо определиться в геодинамическом смысле введенных величин с целью последующей интерпретации.

Введем отношение модулей вектора $\Delta E_j = \dfrac{|\mathbf{G}_j|}{|\mathbf{G}_{j-1}|}$, которое указывает на изменение энергетики (мощности) геодинамического процесса, и разность $\Delta\varphi_j = \varphi_j - \varphi_{j-1}$ - изменение направления (структурно-текстурного строения) этих процессов. Тогда

$$\mathbf{G}_j \mathbf{G}_{j-1} = |\mathbf{G}_j||\mathbf{G}_{j-1}| Cos(\Delta\varphi_j) = \frac{|\mathbf{G}_j|}{|\mathbf{G}_{j-1}|} |\mathbf{G}_{j-1}|^2 Cos(\Delta\varphi_j) = \Delta E_j \, |\mathbf{G}_{j-1}|^2 Cos(\Delta\varphi_j)$$

Между ΔE_j и $\Delta\varphi_j$ существует причинно-следственная связь. Сначала происходит изменение внутренней энергетики системы в результате воздействия на систему внешних факторов с переходом одного вида энергии в другой. Изменение внутренней энергии системы приводит к изменению ее структурно-текстурного строения. Это изменение происходит с задержкой по времени. Иными словами, нельзя изменить структуру системы не изменив ее внутреннюю энергию.

Выводы. Рассмотренный подход к анализу геодинамических процессов легко распространяется на случай комплексного анализа при исследовании современных геодинамических процессов с использованием различных физических полей: сейсмических, термических и т. п., синхронизированных по времени. Он также может быть использован при комплексном анализе геофизических данных в разведочной геофизике.

Рассмотренный подход позволяет ставить и исследовать следующие вопросы: какова должна быть длительность полевых исследований по изучению конкретного геодинамического процесса, каков должен быть шаг дискретных во времени измерений, какие точки в пространстве должны исследоваться при решении конкретной задачи мониторинга современных геодинамических процессов. Эти вопросы могут получить ответ при развитии настоящего подхода, основанного на формальном анализе динамических систем. Однако он лишен физико-геологического смысла. В связи с этим, актуальным является развитие теории и практики мониторинга современных геодинамических процессов на физико-геологической основе, что будет являться предметом дальнейших исследований.

При исследовании систем, в том числе и динамических, широко используется теория графов, позволяющая устанавливать связи между отдельными частями этой системы и анализировать как взаимовлияние этих частей друг на друга, так и динамику всей системы в целом. В связи с этим окончательная интерпретация результатов, полученных по предложенному подходу, должна осуществляться с использованием этой теории и имеющейся геолого-геофизической информацией.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 13-05-12091.