УДК 004.942

О.Р. КУЗИЧКИН, Д.И. СУРЖИК, М.Д. БАКНИН, Е.А. ГАНТОВА

О.Р. KUZICHKIN, D.I. SURZHIK, M.D. BAKNIN, E.A. GANTOVA

**АЛГОРИТМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СТАЦИОНАРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ КАРСТОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

**ALGORITHMS OF PRELIMINARY DATA PROCESSING OF STATIONARY OBSERVATIONS IN LOCAL ZONES OF KARSTOLOGICAL MONITORING**

*Статья посвящена разработке алгоритмов предварительной обработки данных стационарных наблюдений в локальных зонах карстологического монитинга. Алгоритмы подразумевают построение модели приповерхностных неоднородностей в зоне локального геодинамического контроля и ее графа связей. Предложенный в данной работе подход к построению геоэлектрической модели зоны контроля на основе передаточных функций позволяет провести формализировать описание объектам контроля, включая определение зон повышенной трещиноватости в карстующихся отложениях, наличие полостей и погребенных карстовых воронок, а также выделение через параметры общих показателей изменчивости физико-механических свойств карсту­ющихся и покров­ных отложений. Предложенный в данной работе подход позволяет описать любую структуру геоэлектрического разреза с наличием карстовых неоднородностей дробной функцией и оперировать при геодинамическом контроле массивами действительных чисел, что облегчает автоматизацию процессов использования теоретических результатов моделирования и интерпретации экспериментальных данных.*

*Ключевые слова: карстово-суффозионный процесс, карстологический мониторинг, геоэлектрическая модель, геодинамическая передаточная функция*

*The article is devoted to the development of algorithms for preliminary processing of stationary observations in local zones of karstological monitoring. Algorithms mean the construction of a model of near-surface inhomogeneities in the zone of local geodynamic control and its graph of connections. The approach proposed in this paper for constructing a geoelectrical model of a control zone based on transfer functions allows us to formalize the description of control objects, including the definition of zones of increased fracturing in karsting sediments, the presence of cavities and buried karst funnels, as well as the separation through parameters of general indices of the variability of physico-mechanical properties karstuyuschihsya and integumental deposits. The approach proposed in this paper makes it possible to describe any structure of the geoelectrical section with the presence of karstic inhomogeneities by a fractional function and to operate under arrays of real numbers under geodynamic control, which facilitates the automation of the processes of using the theoretical results of modeling and interpreting experimental data.*

*Keywords: karst-suffusion process, karstological monitoring, geoelectric model, geodynamic transfer function*

**Введение**

Геофизические методы, применяемые в системе карстологического мониторинга, основаны на регистрации вариаций естественных и искусственных физических полей, отражающих изменения состава и состояния карстующихся и покровных пород [1]. При мониторинге геофизическими методами производится слежение за изменениями физических полей во времени, которые характеризуют развитие карстового процесса и сопровождающих его явлений. При этом обязательным условием является организация долговременных режимных наблюдений для получения информации об изменениях во времени характеристик состояния массива карстующихся и покровных пород, что необходимо для оценки карстоопасности на текущий момент времени и ее прогноза на расчетный период [2]. В настоящее время общепринятым и установленным нормативными документами является двухразовый цикл проведения наблюдений в год, что считается достаточным для установления прогноза интенсивности карстовых процессов [3]. Однако как показали последние исследования в некоторых случаях этого недостаточно, периодичность наблюдений должна выбираться в соответствии с ожидаемой скоростью развития карстово-суффозионных процессов и их проявлений [4-6].

Для получения достоверной и точной информации о строении и физических свойствах исследуемого геологического массива, в условиях наличия в нем карстово-суффозионных процессов, применяется комплексный подход. Комплексирование методов осуществляется исходя из их возмож­ностей при решении постав­ленных задач в конкретных инженерно-геологических условиях. Включаемые в систему геофизических наблюдений методы должны обеспечить получение достоверной и точной информации о строении и физических свойствах контролируемого геологического массива, что позволяет устранить неоднозначность решения обратной задачи до минимума [7]. При этом основой построения сети геофизических наблюдений является выбор и обоснование шага наблюдательной сети, точность и временной интервал наблюдений, а также применяемые в каждой местной точке наблюдения геофизические методы.

При организации стационарной сети карстологического мониторинга на закарстованных территориях необходимо решить ряд задач, которые решаются исходя из конкретных геологических условий. Наряду с традиционными инженерно-геологическими задачами (оценка мощности и литологии покровных и карстующихся отложений, определение уровня грунтовых вод и т.д.) выделяются и решаются чисто карстологические задачи [8]. На предварительной стадии обработки геоэлектрических данных карстологического мониторинга необходимо построить геоэлектрическую модель зоны контроля которая определяет зоны повышенной трещиноватости в карстующихся отложениях и оценка степени их разрушенности, наличие полостей и погребенных карстовых воронок, а также общие показатели изменчивости физико-механических свойств карсту­ющихся и покров­ных отложений. В настоящее время при использовании геоэлектрических методов геодинамического контроля при геотехническом мониторинге пользуются моделью карстовых процессов в виде передаточной функции.

**Передаточная функция геоэлектрического разреза**

При организации контроля геодинамических вариаций приповерхностных неоднородностей с использованием электромагнитных низкочастотных методов зондирования сред используется обработка информации, основанная на определении параметров геоэлектрических моделей по получаемым электролокационным изображениям этих неоднородностей. При этом нет необходимости пользоваться точными решениями электроразведочных задач, так как нас интересует лишь относительные геодинамические изменения параметров принятых геоэлектрических моделей [9].

В этом случае допустимо использовать аппроксимацию передаточных функций геоэлектрического разреза эквивалентными дробно-рациональными функциями комплексного переменного , физически реализуемых дискретными электрическими цепями с учетом эквивалентных схем замещения. Для решения задач геодинамического контроля эквивалентность функций геоэлектрического разреза должна обеспечивать совпадение характеристик не на всем бесконечном диапазоне частот и пространственных координат, а только на ограниченном отрезке. В этом случае передаточная функция задает совокупность дискретных электрических цепей, определяемых совокупностью унитарных схем замещения частиц среды и применяемым геоэлектрическим методом геодинамического контроля. При использовании электромагнитных методов контроля сред в низкочастотном диапазоне волн геодинамика отдельных выделенных объектов хорошо описывается при представлении передаточной функции [10] в виде:

, (1)

где коэффициенты  и  являются функциональными зависимостями от пространственных параметров геологических пород, слагающих геологический разрез, а также вектора геодинамических вариаций.

При этом точность приближения может быть оценена по критерию Чебышева:

. (2)

Весовой множитель  определяется применяемым геоэлектрическим методом выделения пространственных геодинамических вариаций для объекта исследования в зоне контроля  и диапазоне частот .

Для простейшего случая в виде точечного источника, расположенного на поверхности однородного полупространства с параметрами  и :

, , .

Приповерхностные неоднородности проявляются в виде разнообразных и иногда сложных геологических форм и соответственно имеют сложную геоэлектрическую структуру. При представлении геоэлектрического разреза моделью слоистого несовершенного диэлектрика приповерхностные неоднородности представляются в виде параллельно-последовательных моделей верхних слоев разреза. Данные модели имеют неоднородную структуру не только поперек слоистого полупространства, но и вдоль напластований. При этом, неоднородность электрических параметров вдоль напластований может быть аппроксимирована в первом приближении моделями, представляющими собой ЭГМ с горизонтальными, вертикальными и наклонными границами раздела двух сред.

В рамках рассматриваемой 2-D модели, структура неоднородности может быть представлена комбинацией наборов сред вдоль слоистости (рис.1). В данной модели  - электрические параметры приповерхностной неоднородности, определяющие передаточные функции слоя, который содержит неоднородность.

В рассматриваемой модели два верхних слоя определяют тип модели приповерхностных неоднородностей: двухслойную анизотропную среду, пласт или эллипсоид вращения. С приповерхностными неоднородностями в виде двухслойных сред приходится иметь дело при изучении скальных пород и организации мониторинга карстовых провалов в кровле карбонатных и сульфатных пород. Неоднородности в виде пластов, обусловлены наличием в массиве горных пород горизонтов и линз пресных и минерализованных вод, а также многолетнемерзлых пород. Модель типа эллипсоида вращения аппроксимируют объекты искусственного и естественного происхождения с изометрическим сечением. К ним относят трубопроводы и горные выработки, а также карстовые пещеры.



а) б)

Рисунок 1 - Модель приповерхностных неоднородностей в зоне локального геодинамического контроля и ее граф связей

Размерность полинома Гурвица для данного графа связей (рисунок 2б) геоэлектрической 2-D модели: . В этом случае коэффициенты модели, являются параметрами, определяемыми в процессе алгоритма построения модели. При этом коэффициент  характеризует пространственные связи между унитарными блоками графа связей, а коэффициент  принимает значения в соответствии с электромагнитными параметрами соответствующего блока:

.

Представление приповерхностных неоднородностей в виде модели несовершенного диэлектрика (2), физически реализуемой дискретными электрическими цепями, является исходным для построения модели передаточной функции геоэлектрического разреза в виде эквивалентных дробно-рациональных функций комплексного переменного (1).

**Пространственная и временная дискретизация данных локальных зон карстологического мониторинга**

Предположим, на некотором произвольном участке  регистрируется геодинамический процесс, заданный вектором параметров . Текущая пространственная погрешность определения регистрируемого геодинамического процесса:

, (3)

где , - регистрируемый вектор параметров.

Таким образом, среднеквадратическая динамическая погрешность регистрации геодинамики карстовых процессов на рассматриваемом участке определяется:

, (4)

где - общее количество контролируемых геодинамических параметров. В случае нормального распределения погрешности регистрации геодинамических параметров, вероятность ошибки обнаружения катастрофического проявления карстовых процессов на точке контроля распределенной сети наблюдения может быть определена в соответствии со следующим соотношением:

 . (5)

При выборе шага наблюдательной сети необходимо использовать данные ранжирования территории по карстоопасности исходя из соотношений (1-2) в соответствии с вероятностями ошибок (5). При этом данные геодинамических измерений в алгоритмах анализа используются с весовыми коэффициентами, определяемыми прогнозными вероятностями и расстоянием от объекта контроля до точек наблюдения:

, (6)

где - эмпирические коэффициенты, .- расчетный минимальный размер зоны местного контроля

При пространственном размещении необходимых точек наблюдательной сети карстологического мониторинга исходят, прежде всего, из пространственного расположения объекта и требуемой точности геодинамического контроля карстовых процессов при конкретных условиях организации геотехнического мониторинга. При этом следует учитывать неравномерную пространственную и временную дискретность получаемых данных. В предположении линейной интерполяции функции, задающей регистрируемый вектор геодинамических параметров карстового процесса внутри зоны местных наблюдений линейной функцией:

 (7)

Соответственно в этом случае среднеквадратичная погрешность дискретизации для зоны местного контроля определится следующим соотношением:

. (8)

где .

Приведенные соотношения являются базовыми для построения алгоритма определения требуемую дискретности и мест размещения точек регистрации параметров карстовых процессов при геодинамическом контроле.

Временные интервалы сбора данных геофизических наблюдений должны обеспечивать достоверное определение тенденции и интенсивности развития карстовых и карстово-суффозионных процессов на изучаемых участках, а также для контроля и прогноза образования провалов и оседаний. Периодичность наблюдений выбирается в соответствии с установленной или ожидаемой скоростью развития карстово-суффозионных процессов и их проявлений. При этом должно соблюдаться условие

. (9)

где  - скорость протекания карстовых процессов, определяемая качественным изменением выделенных геодинамических параметров. Однако это условие не учитывает техногенного ускорения карстовых процессов и технологических затрат на проведение мониторинга. Обычно для разработки программ карстологического мониторинга используют начальные данные, периодичность которых на сравнительно больших территориях составляет 3 - 10 лет в зависимости от степени закарстованности территории.

**Выводы**

Предложенный в данной работе подход к построению геоэлектрической модели зоны контроля на основе передаточных функций позволяет провести формализировать описание объектам контроля, включая определение зон повышенной трещиноватости в карстующихся отложениях, наличие полостей и погребенных карстовых воронок, а также выделение через параметры общих показателей изменчивости физико-механических свойств карсту­ющихся и покров­ных отложений.

На основании вышеописанного, можно сделать вывод, что предложенный в данной работе подход позволяет описать любую структуру геоэлектрического разреза с наличием карстовых неоднородностей дробной функцией и оперировать при геодинамическом контроле массивами действительных чисел, что облегчает автоматизацию процессов использования теоретических результатов моделирования и интерпретации экспериментальных данных. Кроме того, использование полученных соотношений, упрощает проведение геодинамической оценки вариаций отдельных выделяемых объектов исследования на основе анализа модельных изменений коэффициентов в передаточной функции геоэлектрического разреза.

**Благодарности**

Статья выполнена при поддержке гранта РФФИ [18-48-310025](https://kias.rfbr.ru/index.php)p\_a

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Korolev V.A. /The monitoring of the geological environment. -M .:MGU,1995.- 272 p.
2. Кожевникова В.Н. Методика оценки устойчивости закарстованных территорий. - Инженерная геология, 1984, № 2, с. 26-40.
3. Максимович Г. А. Основы карстоведения. Пермь, 1963, т. I; 1969, т. II.
4. Dorofeev N. V., Kuzichkin O. R., Eremenko V. T., The method of selection of key objects and the construction of forecast function of the destructive geodynamic processes // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, Book2 Vol. 1, pp 883-890
5. Kuzichkin O., Grecheneva A., Bykov A., Dorofeev N., Romanov R., Optimization of an equipotential method of electroinvestigation for a research of karst processes // SGEM. Volume 17, Issue 52, 2017, Pages 681-688.
6. Sharapov R., Kuzichkin O. Geodynamic Monitoring in Area of Nuclear Power Plant // Applied Mechanic and Materials. Vol. 492, 2013. pp. 556-560
7. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании // М.: АЭН, 1999. – 220 с.
8. Родионов Н. В. Инженерно-геологические исследования в карстовых районах. М., 1958.
9. Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Regression prediction algoritm of suffusion processes development during geoelectric monitoring. // [Advances in Environmental Biology](http://elibrary.ru/contents.asp?titleid=35071). 2014. № 8. P. 1404-1410.
10. Sharapov R., Kuzichkin O. Monitoring of Karst-Suffusion Formation in Area of Nuclear Power Plant // Proceedings of the 7th 2013 IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 12-14 September 2013, Berlin, Germany. Vol. 2, 2013. P. 810-813.

**Кузичкин Олег Рудольфович**

Белгородский национальный исследовательский университет, г. Белгород

Д.т.н., профессор, институт инженерных технологий и естественных наук

E-mail: [Kuzichkin@bsu.edu.ru](mailto:Kuzichkin@bsu.edu.ru)

**Суржик Дмитрий Игоревич**

Владимирский государственный университет, г. Владимир

К.т.н., доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах»

E-mail: arzerum@mail.ru

**Бакнин Максим Дмитриевич**

Белгородский национальный исследовательский университет, г. Белгород

Аспирант, институт инженерных технологий и естественных наук

E-mail: [m.baknin@yandex.ru](mailto:m.baknin@yandex.ru)

**Гантова Елизавета Александровна**

Владимирский государственный университет, г. Владимир

Магистрант кафедры «Управление и контроль в технических системах»