

Д.Н. Шурыгин, Т.В. Литовченко, А.А. Заика, В.А. Добровольский

ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ НАТУРНО-МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭВРИСТИЧЕСКОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Установление корреляционных взаимосвязей различных горно-геологических показателей (факторных полей) повышает достоверность геометризации. Например, при оценке степени устойчивости пород непосредственной кровли угольного пласта можно прогнозировать физико-механические свойства горных пород на основе геофизических параметров, измеренных в разведочных выработках. При выборе оптимальной математической модели регрессии необходимо учитывать изменения величины коэффициента детерминации. Его уменьшение означает, что отображение искомой закономерности зависимой величины в модели недостаточное и ее следует дополнить с учетом влияния на закономерность ранее упущенных факторов. Если коэффициент детерминации по мере усложнения модели достигает минимального значения, а затем начинает увеличиваться, то модель уже содержит избыточную детальную структуру, которая отображает лишь частную реализацию случайных отклонений зависимой величины в данном эксперименте. По мере отработки угольного месторождения постоянно пополняется маркшейдерская и геологическая информация о строении и свойствах вмещающих горных пород, которая должна использоваться для диагностики состояния углевмещающей толщи (структуры и свойств вмещающих горных пород) на участках, планируемых к отработке.

Ключевые слова: горно-геометрическая модель, математическое моделирование, планирование горных работ, натурно-модельный эксперимент, самоорганизация моделей.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-89-94

Введение

Вопросами установления взаимосвязи между параметрами массива горных пород занимались многие исследователи. В зарубежной литературе в работе [1] W. Li с соавторами предложил использовать цепи Маркова для прогнозирования гипсометрии кровли и почвы угольного пласта, то есть определять высотные отметки на основе вероятности появления

тех или иных значений с учетом имеющейся информации. R.A. Thompson в работе [2] описал моделирование процесса осадконакопления в виде вероятностного процесса формирования и размыва пластов. В США на основании анализа обрушений кровли в 37 шахтах был разработан рейтинг кровли угольных шахт (Coal Mine Roof Rating — CMRR), который рассчитывается с учетом прочности по-

род, слагающих кровлю, характера контактов между слоями, трещиноватости и обводненности пород [3]. В работах [4, 5] предложена модель для прогнозирования степени обрушаемости кровли на основе нечеткой логики (точность составила 85–97%). В работе [6] на основе метода группового учета аргументов (МГУА) [7] получено выражение для прогноза шага первичной посадки кровли, а также для определения размера зоны деформаций выработки впереди лавы от среднемесячной скорости подвигания лавы, длины лавы и максимального изменения высоты выработки. Точность и надежность расчета показателей можно значительно повысить при использовании большого объема косвенной информации в виде корреляционных взаимосвязей между горно-геологическими показателями [8–11].

Теория вопроса

Повышение эффективности планирования развития горных работ обеспечивается на основе использования прогнозных карт, построенных на основе адекватных математических моделей размещения горно-геологических показателей. Процесс геометризации и прогнозирования показателей в геологическом пространстве, объединяющий результаты геологоразведочных работ и моделирования, может быть представлен в терминах натурно-модельного эксперимента [12].

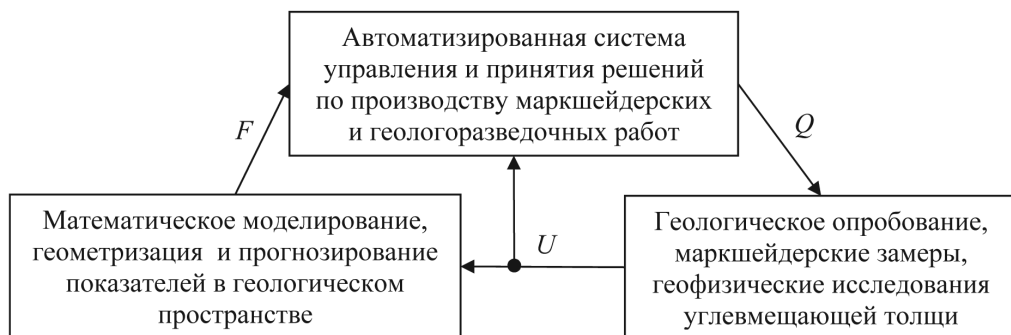
Информация о свойствах полезного ископаемого и пород вмещающей толщи формируется в ходе геологоразведочных и маркшейдерских работ, которым присущи следующие методологические, организационные и технические особенности:

- опробование дает характеристику лишь небольшой части геологического пространства в зоне влияния разведочной скважины;
- достоверность прогноза размещения геологического показателя зависит от пространственного положения точек опробования и параметров разведочной сети;
- погрешность интерполяции значений показателей в геологическом пространстве зависит от наблюдаемой пространственной изменчивости свойств массива горных пород, выявленной в ходе разведочных работ.

Взаимодействие геологоразведочно-го процесса (натурного испытания) с математическим моделированием позволяет непрерывно корректировать и уточнять модели размещения различных показателей месторождения полезного ископаемого по мере появления новой маркшейдерской и геологической информации в ходе детальной и эксплуатационной разведки.

Методы анализа

Структурная схема натурно-модельного эксперимента с целью геометри-



Структурная схема натурно-модельного эксперимента

зации форм и свойств углевмещающей толщи по данным геологического опробования и маркшейдерских замеров приведена на рисунке.

Требуемая информация о свойствах углевмещающей толщи для планирования горных работ формируется согласно вектору управляющих сигналов Q , генерируемому автоматизированной системой управления с учетом вектора измерительной информации U (результаты геологоразведочных работ) и результатов моделирования F . При широком внедрении на угледобывающих предприятиях вычислительной техники и программных средств для решения различных задач горного производства, экспериментальный (измерение) и расчетный (моделирование) методы обычно не применяются в комплексе. Так, использование компьютерной техники в геологоразведочных работах, в основном, ограничивается решением задач автоматизации работ и статистической обработкой полученных данных.

В процедуре натурно-модельного эксперимента измерение показателей углевмещающей толщи и моделирование их размещения в геологическом пространстве являются равноценными составляющими. Их эффективное взаимодействие как единого процесса позволяет, с одной стороны, разрабатывать обоснованные математические модели размещения показателей, адекватные природным особенностям угленакопления, а с другой — уточнить требования к метрологическому обеспечению измерений (погрешностям). В данной работе предметом исследования являются математические модели, применяемые при геометризации показателей углевмещающей толщи. В силу сложности геологических процессов, участвующих в формировании горно-геологических условий залегания месторождений полезных ископаемых, при моделировании необхо-

димо использование вероятностно-статистических методов.

Построение многомерных математических моделей основывается на двух принципах эвристической самоорганизации сложных систем [7]. Первый принцип заключается в использовании внешнего дополнения в виде совокупности контрольных данных, не участвующих в вычислении параметров модели (например, неизвестных коэффициентов уравнения регрессии). Он основан на теореме Геделя о неполноте, которая для регрессионного анализа устанавливает невозможность нахождения единственной оптимальной модели при определении коэффициентов уравнения по МНК (при использовании всех экспериментальных данных). Для получения наилучшей зависимости, описывающей геологический объект, требуется внешний критерий (прием регуляризации). Второй особенностью является принцип неокончателенности решений, т.е. получение оптимальной модели путем последовательного приближения к ее окончательному виду, а не сразу одним приемом, как это делается в методах классического регрессионного анализа.

При этом уменьшение машинного времени выбора оптимальной модели предлагается достигнуть за счет использования информации о параметрах математических моделей, полученных на предыдущем шаге моделирования (алгоритм с последовательным выделением трендов) [7]. Прогнозное уравнение имеет вид:

$$P = a_0 + a_1 f_1(x_1) + a_2 f_2(x_2) + \dots + a_m f_m(x_m),$$

где $f_1(x_1), f_2(x_2), \dots$ — уравнения регрессии по аргументам x_1, x_2, \dots .

На первом этапе выделяется тренд $f_1(x_1)$ и вычисляется остаток (разность известных значений показателя P и тренда

$f_1(x_1)$). Далее остаток аппроксимируется вторым трендом $f_2(x_2)$ и находится следующий остаток. Этот процесс продолжается до достижения минимума расхождения между известными и модельными значениями показателя. По мере усложнения уравнения доля закономерной составляющей в сумме квадратов остатков уменьшается до минимума. Прием регуляризации позволяет отделить закономерную составляющую от случайной [7]. Этот прием получил широкое распространение в алгоритмах метода группового учета аргументов (МГУА).

Обсуждение результатов

Определение значений параметров модели по натурным наблюдениям представляет собой процесс решения обратной задачи. При геометризации это необходимо для выбора оптимальной математической модели размещения показателей по некоторому критерию оптимизации. Обратные задачи связаны с обращением причинно-следственной связи формирования наблюдаемого разреза углевмещающей толщи (следствия) и палеографическими условиями осадконакопления (причины). Обратные задачи не являются корректными, однако принцип внешнего дополнения в теории самоорганизации математических моделей сложных систем позволяет рассматривать его как вариант критерия регуляризации. Как было показано выше, такой подход позволяет выбрать единственное решение при выборе оптимальных коэффициентов уравнения регрессии, связывающей показатели углевмещающей толщи. С другой стороны, принцип неокончателных решений (в частности, алгоритм с последовательным выделением трендов) за счет отделения закономерной составляющей размещения показателя от случайной составляющей позволяет повысить устойчивость решения по отношению к ма-

лым возмущениям (ошибкам) данных наблюдений. Таким образом, принципы самоорганизации математических моделей сложных систем обеспечивают параметрическую оптимизацию моделей на основе решения обратной задачи с применением регуляризации. Принцип эвристической самоорганизации, используемый в МГУА, позволяет повысить точность математического моделирования с максимально возможным сокращением субъективной априорной информации со стороны исследователя модели.

Заключение

Оптимальные математические модели размещения показателей строятся на принципах их эвристической самоорганизации. При этом принцип неокончателных решений позволяет выбрать оптимальную модель по сложности (количеству аргументов, обеспечивающих наибольший вклад в объяснение дисперсии показателя). Принцип внешнего дополнения позволяет осуществить объективную оценку адекватности математической модели имеющимся натурным измерениям на основе критерия регуляризации. Математическое моделирование углевмещающей толщи как сложной системы факторных полей горно-геологических показателей часто встречается в задачах изучения генетически обусловленных факторных взаимосвязей показателей (без учета их пространственного размещения). При планировании развития горных работ на выемочных участках угольной шахты установление корреляционных взаимосвязей различных показателей необходимо для повышения достоверности их прогнозирования и геометризации. Оптимальное уравнение регрессии для моделирования факторного поля показателя определяется методом группового учета аргументов (МГУА).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li W., Luo Ch., Yang H., Fan O. Memory cutting of adjacent coal seams based on a hidden Markov model // Arabian journal of geosciences. — 2014. — Vol. 71 — P. 5051–5060.
2. Thompson R.A. stochastic model of sedimentation // Mathematical geology. — 1984. — Vol. 16, No. 8. — P. 753–778.
3. Molinda G.M., Mark C., Debasis D. Using the coal mine roof rating (CMRR) to assess roof stability in U.S. coal mines // Journal of minerals metallurgy and materials (India). — 2001. — Vol. 49, No. 8–9. — P. 314–321.
4. Farid M., Mohamadi M., Abadi H., Yazdani-Chamzini A., Yakhchali S.H., Basiri M.H. Developing a new model based on neuro-fuzzy system for predicting roof fall in coal mines // Neural computing and applications. — 2013. — Vol. 23, No. 1. — P. 129–137.
5. Ghasemi E., Ataei M. Application of fuzzy logic for predicting roof fall rate in coal mines // Neural computing and applications. — 2013. — Vol. 22, No. 1. — P. 311–321.
6. Антипов И.В., Лобков Н.И., Сергиенко А.И. Выбор метода математического моделирования и установление рациональной длины лав // Физико-технические проблемы горного производства. — 2011. — № 14. — С. 68–75.
7. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. — Киев: Наукова думка, 1982. — 296 с.
8. Шурыгин Д.Н. Горно-геометрическая оценка достоверности технико-экономических показателей при планировании горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 9 (S22). — С. 3–21.
9. Шурыгин Д.Н. Горно-геометрическая оценка устойчивости оптимальных технических решений при планировании горных работ и прогнозе рисков недропользования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 9 (S22). — С. 22–41.
10. Шурыгин Д.Н., Голик В.И. Исследование процесса автоматизации прогнозирования горно-геологических условий в геоинформационных системах управления горным предприятием // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 12 (S419). — С. 3–11.
11. Калинин В.М., Руденко В.В. Геометризация и прогнозирование горно-геологических условий отработки угольного пласта как важный этап календарного планирования развития горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 11 (S47). — С. 3–8.
12. Бессонов А.Н., Солодихин Г.М., Солодовников В.А. Натурный эксперимент: информационное обеспечение экспериментальных исследований / Под ред. Н.И. Баклашова. — М.: Радио и связь, 1982. — 304 с. **ЦИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шурыгин Дмитрий Николаевич¹ — кандидат технических наук, доцент,
e-mail: shurygind@mail.ru,

Литовченко Татьяна Викторовна¹ — кандидат технических наук, доцент,

Заика Алексей Александрович¹ — магистрант,

Добровольский Владимир Аркадьевич¹ — магистрант,

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analitcheskiy byulleten'. 2017. No. 8, pp. 89–94.

UDC 622.1

D.N. Shurygin, T.V. Litovchenko, A.A. Zaika, V.A. Dobrovolskiy

GEOMETRIZATION OF INDEXES BASED ON THE PRINCIPLES OF REAL–MODEL EXPERIMENT AND EURISTIC SELF-ORGANIZATION OF MATHEMATICAL MODELS OF COMPLEX SYSTEM

Establishing correlation relationships between various geological indicators (factor field) increases the reliability of the geometrization. For example, in assessing the degree of stability of the im-

mediate roof rocks of a coal seam it is possible to predict the physical-mechanical properties of rocks based on geophysical parameters measured in the exploration workings. When choosing the most appropriate mathematical regression model is necessary to account for changes in the magnitude of the coefficient of determination. Its reduction means that the display of desired patterns for the dependent variable in the model is insufficient and should be supplemented with the influence on the pattern of previously overlooked factors. If the coefficient of determination as the complexity of the model reaches a minimum value and then begins to increase, the model already contains a redundant detailed structure, which shows a particular realization of the random deviations of the dependent variable in this experiment. With further development of the coal field is constantly updated surveying and geological information on structure and properties of enclosing rocks to be used to diagnose the state of uglinesses depth (structure and properties of enclosing rocks) in areas planned for mining.

Key words: mining-geometrical model, mathematical modeling, mine planning, full-scale modeling experiment, self-organization models.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-89-94

AUTHORS

Shurygin D.N.¹, Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: shurygind@mail.ru,
Litovchenko T.V.¹, Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor,
Zaika A.A.¹, Master's Degree Student,
Dobrovolskiy V.A.¹, Master's Degree Student,
¹ M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
346428, Novocherkassk, Russia.

REFERENCES

1. Li W., Luo Ch., Yang H., Fan O. Memory cutting of adjacent coal seams based on a hidden Markov model. *Arabian journal of geosciences*. 2014, vol. 71, pp. 5051–5060.
2. Thompson R.A. stochastic model of sedimentation. *Mathematical geology*. 1984, vol. 16, no 8, pp. 753–778.
3. Molinda G. M., Mark C., Debasis D. Using the coal mine roof rating (CMRR) to assess roof stability in U.S. coal mines. *Journal of minerals metallurgy and materials (India)*. 2001, vol. 49, no 8–9, pp. 314–321.
4. Farid M., Mohamadi M., Abadi H., Yazdani-Chamzini A., Yakhchali S. H., Basiri M. H. Developing a new model based on neuro-fuzzy system for predicting roof fall in coal mines. *Neural computing and applications*. 2013, vol. 23, no 1, pp. 129–137.
5. Ghasemi E., Ataei M. Application of fuzzy logic for predicting roof fall rate in coal mines. *Neural computing and applications*. 2013. Vol. 22, no 1, pp. 311–321.
6. Antipov I.V., Lobkov N.I., Sergienko A.I. *Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva*. 2011, no 14, pp. 68–75.
7. Ivakhnenko A.G. *Induktivnyy metod samoorganizatsii modeley slozhnykh sistem* (Inductive method of complex system model self-organization), Kiev, Naukova dumka, 1982, 296 p.
8. Shurygin D.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 9 (S22), pp. 3–21.
9. Shurygin D.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 9 (S22), pp. 22–41.
10. Shurygin D.N., Golik V.I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 12 (S419), pp. 3–11.
11. Kalinchenko V.M., Rudenko V.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 11 (S47), pp. 3–8.
12. Bessonov A.N., Solodikhin G.M., Solodovnikov V.A. *Naturnyy eksperiment: informatsionnoe obespechenie eksperimental'nykh issledovaniy*. Pod red. N.I. Baklashova (Full-scale experiment: information support of experimental research. Baklashov N.I. (Ed.)), Moscow, Radio i svyaz', 1982, 304 p.