

Н.И. Абрамкин, А.Н. Абрамкина, К.С. Ващенко
ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА ПРИ МОНИТОРИНГЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Изложены методические основы технического и экономического мониторинга технологических систем угольных шахт на основе регуляризирующего байесовского подхода.

Ключевые слова: технологические схемы, угольные шахты, регуляризирующий байесовский подход (РБП), объект управления (ОУ), шкала динамических ограничений (ШДО).

В современных условиях функционирования технологических систем действующих шахт угольных компаний в условиях разноплановой неопределенности методической основой для создания высокоэффективных и работоспособных моделей мониторинга, аудита и управляющих решений может служить регуляризирующий байесовский подход (РБП). Его преимущества состоят в его способности обеспечивать получение устойчивых оценок и моделей в условиях достаточных выборов, разнотипной информации, значительной неточности данных и нечеткости знаний об объекте управления (ОУ), условиях управления (УУ) и внешней среде. Как правило, в задачах математического моделирования сложных систем априорных знаний недостаточно, и привлекают имеющиеся статистические (динамические и детерминированные) сведения и данные. В математической постановке задачи моделирования ОУ, УУ и среды, как и всего процесса принятия решений следует рассматривать как некорректные обратные задачи восстановления модельной зависимости по статистическим данным, требующие применения регуляризирующих схем для обеспечения сходимости и устойчивости их решений. Регуляри-

зирующие свойства РБП обеспечиваются введением математического аппарата создания, преобразования и передачи шкал с динамическими ограничениями (ШДО), на которых происходит получение, хранение, преобразование, передача и интерпретация данных и знаний, необходимых для формирования моделей ОУ, УУ и среды. Причем, с каждой новой порцией информации происходит преобразование и интеграция ее на соответствующих ШДО, и модели уточняются. Таким образом, в результате подобных преобразований на ШДО в качестве решений могут быть получены оценки состояния, решения о соответствии критериям, модельные представления процессов и ситуаций, выводы, рекомендации, таблицы и карты риска.

Первоочередным и одним из самых сложных вопросов является создание модели оцениваемого объекта. Основными факторами, учитываемыми в модели технологического и экономического мониторинга, являются производственные (S_a), природные (S_b) и социально-экономические (S_c) факторы угольного региона при наличии обобщенного списка ограничений $\{O\}$. К числу ограничений по управлению могут быть отнесены ограничения из-за противодействия других компонен-

тов технологических угольных систем региона, существующих законодательств, ресурсно-техничко-экономических и пространственно-временных ограничений.

В данной концепции для создания методической информационно-технологической платформ ИАС (информационно-аналитической системы) предлагаются возможности регуляризирующего байесовского подхода (РБП) и технологий на его основе.

Отличительной стороной методологии на основе РБП, является ее обобщающая индуктивно-дедуктивная логика, которая позволяет рассматривать объект в системе среды его функционирования, активно взаимодействующей и развивающейся вместе с объектом, что обеспечивает отражение всей совокупности свойств такой сложной технологической системы, какой является производственно-технологическая структура угледобывающего предприятия.

Схема принятия решений на основе методологии РБП является обобщением четких схем принятия решений и правил логического вывода, а также технологий, построенных на их основе, давая возможность получения управляющих решений при недо-стоверных, неполных, неточных априорных или поступающих в процессе измерений данных и информации. Причем технологии РБП, называемые байесовскими интеллектуальными технологиями (БИТ), обеспечивают автоматический контроль достоверности и точности данных, а также адекватности знаний (в частности, моделей на основе формализмов методологии БИТ). В практическом воплощении это комплексы статистических показателей и характеристик данных и знаний. Важным свойством методологии БИТ является возможность обобщения информации на основе структур сопряженных лингвистических шкал, различной информации, представлен-

ной в разнообразной форме: числовой, семантической, аналитической, графической, лингвистической.

Предложенная методика БИТ и конкретные алгоритмы на ее основе позволяют разрабатывать информационные технологии решения задач мониторинга сложных объектов и принятия управленческих решений, гарантирующих получение результатов с требуемым качеством на основании всего объема априорных сведений об объекте и среде его функционирования и отличающихся своей полнотой, объективностью и оптимальностью в конкретных условиях мониторинга и природопользования при значительной априорной неопределенности.

Пусть S – модель сложного объекта, в данном проекте – модель угледобывающего предприятия из комплексной схемы, представленного в рамках методологии РБП в виде сопряженных шкал (гиперкуба), где I_j – число моделируемых свойств объектов, J – число объектов (угольных предприятий и организаций, а также техногенных объектов, таких как линии передачи электроэнергии, тепла, горячей воды, транспортных путей доставки угля и др.).

$$S = \{ si^*j \}, i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$$

Условно адекватная модель технологической схемы угольной шахты с учетом указанных факторов на основе методологии байесовских интеллектуальных технологий (БИТ) может быть записана в виде:

$$S_{\text{ЭИ}} = S_{\text{ал}} * S_{\text{бл}} * S_{\text{сл}} \{O_{\text{ЭИ}}\}$$

где $*$ – символ композиции (аналогичный действию соединения в реляционной алгебре).

Символ I обозначает временную зависимость $S_{\text{ЭИ}} = S_{\text{Э}} \text{ при } t = t_1$.

Эта модель может быть записана в виде совокупного результата БИТ:

$$\{S_{\text{Э}} \{MX\}_i\}_1 = \{\text{argmin } C [\text{Э}_1 \{ \{x\}_1 y \}]\};$$

где $\mathcal{E}$ – алгоритм решения задачи формирования управленческих рекомендаций; y_i – условие реализации уравнения (4.3).

Основные требования к модели определяются свойствами самого техногенного объекта. Иерархичность структуры модели в соответствии с уровнями иерархии объекта и их взаимосвязь отражается в горизонтальном и вертикальном направлениях. В горизонтальном направлении объединяются разнородные объекты или характеристики одного объекта технологической системы, вертикальное направление составляют уровни иерархии признаков характеристик или состояния технологической системы угольных шахт, например, показатели состояния.

Для моделей БИТ требование иерархичности выполняется и модель S_3 представляется в виде формальной записи:

$$S\mathcal{E}_j = (*S\mathcal{E}_{il}) * (*S\mathcal{E}_{il}); j = 1, m, n;$$

где n и m определяют количество уровней иерархии объекта (угольной шахты) в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

Метрологическая обеспеченность модели объекта отражается в форме комплексов статистических характеристик (MX) в виде:

$$\{MX\}_{\mathcal{E}_l} = \{MX\}_{al} * \{MX\}_{bl} * \{MX\}_{cl};$$

$$\{MX\}_{\mathcal{E}_l} = \{ \mathcal{E}_l; T\mathcal{E}_l; P\mathcal{E}_l \}$$

где $\mathcal{E}_l$ – точность результата, $T\mathcal{E}_l$ – надежность, определяемая по уровням ошибок 1 и 2 рода; $P\mathcal{E}_l$ – байесовская апостериорная достоверность результата.

Верхний уровень иерархии таких подсистем экспертных систем (ЭС) отдельных компонент угольной шахты является ЭС в шахтных системных характеристиках, представляющих свойства угольной шахты в целом. Такой подход позволяет обобщать данные и знания о составляющих уголь-

ную шахту объектах в интегральные знания об угольной шахте. Каждый природный объект или среда может быть представлен тремя основными группами факторов: собственных характеристик угольной шахты $OM(S_{ol})$, естественно-природных характеристик среды функционирования $OM(S_{el})$ и антропогенных факторов (S_{al}). Модель типа МДО БИИ такого $OM S_l$ имеет вид:

$$S_l^{(o)} = S_{ol}^{(o)} * S_{el}^{(o)} * S_{al}^{(o)} \{O\}_l;$$

КМХ такой модели имеет вид:

$$\{MX\}_l^{(o)} = \{MX\}_{ol}^{(o)} * \{MX\}_{el}^{(o)} * \{MX\}_{al}^{(o)};$$

С учетом указанных выше типов задач, решаемых в процессе мониторинга модель может быть представлена в виде:

$$S_l^{(OM)} = S_l^{(O)} * S_l^{(x)} * S_l^{(f)} * S_l^{(d)} \{O\}_l^{(xtd)};$$

$$\{O\}_l^{(xtd)} = \{O\}_l^{(x)} * \{O\}_l^{(f)} \{O\}_l^{(d)};$$

где $S_l^{(x)}$; $\{O\}_l^{(x)}$; $S_l^{(f)}$; $\{O\}_l^{(f)}$; $S_l^{(d)}$; $\{O\}_l^{(d)}$ – модели и ограничения статистических данных, знаний и решений, используемых при решении задач мониторинга для соответствующих составляющих модели.

КМХ модели имеет вид:

$$\{MX\}_l^{(OM)} = \{MX\}_l^{(o)} * \{MX\}_l^{(x)} * \{MX\}_l^{(f)} * \{MX\}_l^{(d)};$$

По методологии БИИ технологическая схема угольной шахты может быть представлена моделью, являющейся решением основного уравнения БИИ (с учетом структурных составляющих локальных технологических систем и объектов) в виде:

$$S\mathcal{E}_l = (*S\mathcal{E}_i^{lz} \{O\}_i^{(c)} \mathcal{E}_{il}^{(c)}), j = 1, c;$$

и КМХ, определяющим ее качество:

$$\{MX\}_{j1}^{(co)} = * \{MX\}_{ij} \mathcal{E}_{ij}^{(co)}, j = 1, \alpha;$$

где $S\mathcal{E}_l^{(c)}$ – модель компонентов смеси – локальных технологических систем (предприятий добычи угля, отдельных подсистем угольных шахт и т.д.).

Топологическую взаимосвязь устанавливает пространственная модель угольной шахты :

$$S\mathcal{E}_i^{(\Pi)} = S\mathcal{E}_i^T \{O\}^{(\Pi)} \mathcal{E}_i, i = 1, z;$$

что для модели МДО может быть записано в виде композиции структурной и топографической моделей технологической системы угольной шахты:

$$S\mathcal{E}_i^{(CT)} = S\mathcal{E}_i^{(C)} * S\mathcal{E}_i^{(\Pi)} \{O\} \mathcal{E}_i^{(CT)};$$

с КМХ вида:

$$\{MX\} \mathcal{E}_i^{(CT)} = \{MX\} \mathcal{E}_i^{(C)} * MX \mathcal{E}_i;$$

Модель данного вида может быть использована как для прогнозирования состояния шахтного фонда угольных компаний или отдельной угольной шахты (при времени прогноза $t > t$), так и для восстановления ретроспективы развития их и исторического прошлого ($t < t$).

Измеримые признаки формируют из модели объекта мониторинга модель объекта измерения. Для физической реализации измерений по модели необходимо наличие измерительных шкал, адекватно отражающих свойства модели ОИ. Концепция такой шкалы в виде шкалы с динамическими ограничениями, позволяющая максимально полно реализовать познавательную функцию ИИС, довольно подробно разработана и реализована в системах БИТ.

Согласно целей мониторинга, кратко сформулированных выше, результатами его могут быть:

- значение параметра;
- аналитический вид функциональной зависимости;
- системы аналитических зависимостей, определяющих состояние ОМ;
- лингвистические значения и выражения, определяющие выводы и решения относительно свойств и их состояний для технологических систем угольных шахт;
- рекомендации по обеспечению устойчивого функционирования технологических систем угольных шахт.

Учет априорной информации разного типа производится в процессе построения сопряженных числовых и лингвистических шкал БИИ для определения состояния основных показателей и состояния объекта в соответствии с моделями данного вида.

Устойчивость решений некорректной задачи восстановления состояния техногенного объекта, каким является угольная шахта, по данным мониторинга обеспечивается регуляризирующими свойствами алгоритмов БИИ.

Уникальные способности байесовского регуляризирующего подхода, методов БИИ и построенных на их основе информационных технологий к получению, накоплению и использованию новых знаний в процессе мониторинга и принятия решений создает основу для построения развивающихся моделей объектов и ситуаций, информационных технологий и средств мониторинга угледобывающей среды и систем поддержки принятия инвестиционных решений.

На основании всех приведенных рассуждений основное уравнение для процесса мониторинга качества работы действующих угольных шахт как измерительного процесса, можно представить в виде:

$$S_i = S_i^{ux} * S_i^{uf} * S_i^{ud} \{O\}_i;$$

где символы ux , uf , ud означают этапы сбора статистических данных, получения знаний и принятия решений об угольной шахте соответственно.

Комплекс метрологических характеристик, соответствующий процессу мониторинга, записывается следующим образом:

$$\{MX\}_i^{(ux)} = \{MX\}_i^{(uf)} * \{MX\}_i^{(ud)} * \{MX\}_i;$$

Для системы технологического и экономического управления на угольном предприятии согласно предлагаемой концепции, можно записать уравнение моделирования в виде ком-

позиции систем управления производством, качеством, персоналом, финансами и инвестициями:

$$S_{\Sigma} = S_1 * S_2 * S_3 * S_4 * S_5 * S_6 * S_7 * O$$

На принципах РБП построены различные ИТ мониторинга качества

работы действующих угольных шахт, позволяющие производить технологический, экономический и экологический мониторинг угольных объектов с требуемым качеством и обеспечением всех перечисленных выше требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моррис У.Т. Наука об управлении. Байесовский подход. – М.: Мир, 1971.
2. Гриняев С. Нечеткая логика в системах управления // Компьютерра. – 2001. – № 38. <http://offline.computerra.ru/2001/415/13052/>.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ Петербург, 2005.
4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
5. Нейлор К. Как построить свою экспертную систему. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Хабаров С.П. Экспертные системы (конспект лекций). <http://firm.trade.spb.ru/serp/index.htm>.
7. Гвишиани Д.М., Лисичкин В.А. Прогностика. – М.: Знание, 1968.
8. Куприянов В.В., Фомичева О.Е. Интеллектуализация технологий автоматизированных систем. – М.: МГТУ, 1994.
9. Прокопчина С.В. Модель принятия решений для многокритериальных задач в условиях риска и неопределенности на основе байесовских интеллектуальных технологий / Материалы Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям «SCM-2004». – СПб., 2004.
10. Айвазян С.А. Байесовский подход в экономике. – М.: Мир, 2008. – 350 с.
11. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема Байеса](http://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Байеса).
12. Тулупьев А.Л. Байесовские сети: логико-вероятностный подход. – СПб.: Наука, 2006.
13. Хей Дж. Введение в методы байесовского статистического вывода. М.: Наука, 1987.
14. Tipping M.E. Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine // Journal of Machine Learning. – 2001. – vol. 1. – pp. 211–244.
15. Kropotov D.A., Vetrov D.P. Optimal Bayesian Linear Classifier with Arbitrary Gaussian Regularizer / 7th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding (OGRW2007), Ettlingen, 2007. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Абрамкин Николай Иванович – доктор технических наук, профессор,
Абрамкина Алина Николаевна – аспирантка,
Вашенко Кристина Сергеевна – аспирантка,
МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 622.272:65

BASIC ASPECTS OF BAYESIAN APPROACH TO MONITORING OF MANUFACTURING SYSTEMS IN COAL MINES

Abramkin N.I.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Abramkina A.N.¹, Graduate Student,
Vashchenko K.S.¹, Graduate Student,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Methodological basis of technical and economic monitoring of technological systems of coal mines on the basis of regularizing the Bayesian approach are stated in this article. The Bayesian approach's advantages are in the ability to provide robust estimations and models in the condition of sufficient samples, the heterogeneous information, significant inaccuracies and knowledge about the object of management, control conditions and the external environment. However, it is not enough priori knowledge for the mathematical modeling of complex systems, so they use available static (dynamic and determinate) knowledge and the data. Simulation problems of the control object, environment management and the external environment should be considered

as the incorrect inverse problem of the reconstruction model based on the statistical data that requires the use of regulatory systems to ensure the sustainability of their decisions. Bayesian's approach's regularizing properties are provided by the mathematical apparatus of the creation, the conversion and the scales with dynamic constraints transfer. These things are necessary for the receipt, the storage, the conversion, the transmission and the interpretation of the data and knowledge that are necessary for the object of management and the formation of models of the external environment. What is more, when any new information is received these scales with dynamic constraints transfer vary. In this way as the result of such transformations with scales needed evaluations, decisions in accordance with the criteria, the necessary conclusions can be obtained.

Key words: process charts, coal mines, Bayesian regularization approach (BRA), control object (CO), scale of dynamic constraints (SDC).

REFERENCES

1. Morris U.T. *Nauka ob upravlenii. Baiesovskii podkhod* (Science of control. Bayesian approach), Moscow, Mir, 1971.
2. Grinyaev S. *Komp'yuterra*. 2001, no 38. <http://offline.computerra.ru/2001/415/13052/>.
3. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy simulation in MATLAB and fuzzyTECH), Saint-Petersburg, BKhV Peterburg, 2005.
4. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyy podkhod*, 2-e izd. (Artificial intelligence: Modern approach, 2nd edition), Moscow, Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2006.
5. Neilor K. *Kak postroit' svoyu ekspertnyu sistem* (How to build a custom expert system), Moscow, Energoatomizdat, 1991.
6. Khabarov S.P. *Ekspertnye sistemy (konspekt lektii)* (Expert systems (summery of lectures)), <http://firm.trade.spb.ru/serp/index.htm>.
7. Gvishiani D.M., Lisichkin V.A. *Prognostika* (Prognostics), Moscow, Znanie, 1968.
8. Kupriyanov V.V., Fomicheva O.E. *Intellektualizatsiya tekhnologii avtomatizirovannykh sistem* (Intellectualization of automated system technologies), Moscow, MGGU, 1994.
9. Prokopchina S.V. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam «SCM-2004»* (SCM-2014 Soft Computing and Measurements International Conference Proceedings), Saint-Petersburg, 2004.
10. Aivazyan S.A. *Baiesovskii podkhod v ekonomike* (Bayesian approach in economics), Moscow, Mir, 2008, 350 p.
11. http://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Байеса.
12. Tulup'ev A.L. *Baiesovskie seti: logiko-veroyatnostnyi podkhod* (Bayesian networks: Logical-and-probabilistic approach), Saint-Petersburg, Nauka, 2006.
13. Khei Dzh. *Vvedenie v metody baiesovskogo statisticheskogo vyvoda* (Introduction to the Bayesian statistical inference techniques), Moscow, Nauka, 1987.
14. Tipping M.E. Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine // *Journal of Machine Learning*. 2001. vol. 1. pp. 211–244.
15. Kropotov D.A., Vetrov D.P. Optimal Bayesian Linear Classifier with Arbitrary Gaussian Regularizer / 7th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding (OGRW/2007), Ettlingen, 2007.



**РУКОПИСИ,
ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»**

ОБОСНОВАНИЕ ПРОГРЕССИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ПРИМЕНЕНИЮ БЕЗЛЮДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ УГЛЯ (№ 1054/07-15 от 14.05.15, 13 стр.)

Мельник Владимир Васильевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой,
Федоров Анатолий Сергеевич, МГИ НИТУ «МИСиС», E-mail: msmu-prpm@yandex.ru.

Обоснована необходимость использования нетрадиционных технологий добычи угля. Осуществлен анализ различных вариантов скважинных агрегатов и требований к основным подсистемам комплексов. Рекомендованы значения гидравлических, технических и технологических параметров технологии при двухструйном разрушении угольного массива.

Ключевые слова: скважинная гидравлическая добыча, двухструйное разрушение угольного массива, гидрокомплексы.

THE RATIONALE FOR PROGRESSIVE SOLUTIONS FOR THE EFFECTIVE USE OF UNMANNED TECHNOLOGY OF HYDRAULIC BOREHOLE MINING OF COAL (No. 1054/07-15 from 14.05.15, page 13)

Melnik V.V.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair, Fedorov A.S.¹,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.