

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

И. А. Осипова

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,  
Екатеринбург, Россия

**Аннотация:** Освоение угольных месторождений неразрывно связано с безопасным и рациональным недропользованием. Одной из основных проблем при добыче угля на территории Российской Федерации являются внезапные выбросы угля и газа. В связи с изменившимися внешними и внутренними вызовами развития угледобычи на российских горных предприятиях предлагается рассмотреть проблему в свете интеллектуального управления. Цель исследования – продемонстрировать развитие переходных процессов на угледобывающем горном предприятии во внутреннем их проявлении с позиции интеллектуального управления. Задача работы – создание в первом приближении вероятностной модели процесса возникновения внезапных выбросов угля и газа. В основе исследования лежит построение вероятностной модели с применением Марковских цепей. В результате проведенного исследования на основе построения вероятностной модели можем сделать вывод о том, что необходимо уточнение информации сейсмоакустического мониторинга о состоянии горных пород вблизи проходческих выработок. Решение осложняется выбором стратегии достоверности и уникальностью каждого месторождения.

**Ключевые слова:** переходный процесс, уголь, сложноструктурные месторождения, угольный пласт, внезапные выбросы угля и газа, интеллектуальное управление, вероятностная модель, Марковская цепь.

**Благодарность:** Статья подготовлена по материалам НИР, выполняемой по программе ФНИ государственных академий наук Тема 1 – Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложно-структурных месторождений полезных ископаемых. (№ 0405–2019–0005).

**Для цитирования:** Осипова И. А. Переходные процессы при освоении угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 292–299. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_292.

### Transient processes in coal mining

I. A. Osipova

Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

**Abstract:** Coal mining is a part and parcel of safe and efficient subsoil use. One of the main problems in coal mining in the Russian Federation is coal and gas outbursts. In view of the changed external and internal challenges of coal production Russian mines, it is proposed to consider the problem in the light of intelligent control. The purpose of the study is to demonstrate the internal development of transient processes in a coal mine from the viewpoint of intelligent

control. The study objective is probabilistic first-approximation modeling of initiation of coal and gas outbursts. The study is based on the construction of a probabilistic model using the Markov chains. As a result of the study based the probabilistic modeling, we can conclude that it is necessary to update the seismoacoustic monitoring data on condition of surrounding rock mass around headings. The solution is complicated by the need to select a reliability strategy and by the uniqueness of each coal field.

**Key words:** transient process, coal seam, coal and gas outbursts, intelligent control, probabilistic model, Markov chain.

**Acknowledgements:** The article is based on the R&D project implemented within the framework of the Basic Research Program of the Governmental Academies of Sciences, Topic 1: Methods to Take into Account Transient Processes in Mining Deep-Seated Mineral Deposits of Complex Structure, No. 0405-2019-0005.

**For citation:** Osipova I. A. Transient processes in coal mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):292–299. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_292.

Введение. Проблемой безопасного и рационального ведения горных работ при угледобыче занимаются с момента проектирования горнодобывающего предприятия и до момента его ликвидации, руководствуясь при этом основополагающими документами, которые в свою очередь носят стратегический и тактический характер всего процесса недропользования.

Как отмечает член-корреспондент РАН В. Л. Яковлев: «повышение эффективности технологического и технического уровня ведения горных работ необходимо вести в рамках направления переходных процессов. Ввиду того, что особенностью технологического направления переходных процессов является то, что развитие технологии одного из производственных процессов зачастую обуславливает необходимость соответствующего развития технологии всех смежных ему производственных процессов. Структура технических переходных процессов определяется задачами стратегии и инвестиционными возможностями компании». Под переходными процессами будем понимать этапы стратегии освоения глубокозалегающих сложно-структурных месторождений – долгосрочного плана действий на всех

этапах разведки, проектирования и разработки месторождения до получения товарной продукции на основе методологического подхода на принципах системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности, учитывающих нарастание геологической информации о месторождении при принятии заранее спланированных технологических и технических решений в качестве реакций на изменения внутренних и внешних условий функционирования горного предприятия. Они возникают при росте затрат материальных, трудовых и финансовых ресурсов, сбоях производственного ритма, увеличения текучести кадров, падении дисциплины и т. д. [1].

Так, к примеру, применяемые меры борьбы и предотвращения внезапных выбросов угля и газа носили следующий характер: планирование горных работ велось с первоочередной выемкой неопасных защитных пластов, применением дегазации пластов, дренажных скважин, увлажнением массива, сотрясательного взрыва, упрочнения массива и т. д. Все эти меры требуют высокой технологической дисциплины и непрерывного автоматизированного

контроля в режиме реального времени [2].

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 июня 2014 года № 1099-р утверждена «Программа развития угольной промышленности на период до 2030 года». Программа разработана с учетом новых внутренних и внешних вызовов. В документе предусмотрено более масштабное перемещение центра развития угольной промышленности в Восточную Сибирь и на Дальний Восток [3].

По мнению исследователей [4, с. 278], значительная часть угольных месторождений Сибири и Дальнего Востока является сложноструктурными. Это означает, что уголь представлен свитами сравнительно тонких прослоями. При этом чаще всего не удается разделить вскрышную и добычную зоны. Чисто добычные забои либо отсутствуют, либо сочетаются со смешанными забоями. Такие горно-геологические условия характерны, например, для угольных разрезов Минусинского угольного бассейна [4, с. 278].

Помимо вышеупомянутого государственного документа, на заседании правительства от 27 февраля 2020 г. была рассмотрена «Программа развития угольной промышленности до 2035 года». В своем выступлении министр энергетики А. В. Новак отметил следующее: «... Предусмотрено создание центров цифровых компетенций, включая дальнейшее развитие функционала комплексов «Умная шахта», «Интеллектуальный карьер», «Интеллектуальный транспорт» и «Центры управления». С целью повышения уровня промышленной безопасности и улучшения условий труда на шахтах, разрезах ... предусматривается актуализация требований к про-

мышленной безопасности, внедрение систем государственного дистанционного мониторинга, применение риск-ориентированного подхода при организации контроля и надзора...» [5].

В связи с вышеизложенным можем говорить о двух основных аспектах в рамках переходных процессов, влияющих на угледобычу. Это географический аспект и интеллектуальное управление (рис. 1).

Поскольку с позиции географического аспекта большая часть угледобывающих предприятий в центральной России по многим показателям и факторам ликвидированы, тем самым мы можем констатировать переходный процесс в связи с перемещением центра развития угледобычи.

Относительно интеллектуального управления в этом направлении ведутся научные исследования, где есть возможность заменить человеческий ум, выработать и спланировать стратегию управления и принятия решений в сложных прогнозных и аварийных ситуациях на горнодобывающем предприятии. Помимо этого, существуют объективные причины и признаки, не допускающие участия горняков в процессе ведения горных работ, а также оценки количества и качества добываемого угля. Все это в свою очередь говорит о переходных процессах на уровне управления знаниями об объекте эксплуатации.

В настоящее время мы можем говорить о происходящих переходных процессах как во внешнем проявлении (эффективный процесс освоения вновь введенного в отработку угольного месторождения или ведение отработки угольного месторождения на протяжении долгого времени и т. д.), так и о внутреннем (безопасное и рациональное ведение подземных или открытых горных работ и т. д.) проявлении [6].



Рис. 1. Иллюстрация двух аспектов, связанных с переходными процессами влияющих на угледобычу  
 Fig. 1. Illustration of two aspects connected with transient processes affecting coal production

В связи с этим целью исследования является продемонстрировать развитие переходных процессов на угледобывающем горном предприятии во внутреннем их проявлении с позиции интеллектуального управления. Задачей работы является показать, что в рамках технологического направления переходных процессов, протекающих на угледобывающих горных предприятиях, может быть создана в первом приближении вероятностная модель процесса возникновения внезапных выбросов угля и газа, позволяющая предупредить выброс.

Методы исследования. В рамках возможности представления качественного перехода массива в выбросоопасное состояние и воздействия заранее на его свойства так, чтобы не допустить этого процесса [7, с. 67, 8], рассмотрим применение Марковских цепей.

Случайный процесс, протекающий в системе с дискретными состояниями, называется марковским, если для любого момента времени  $t_0$  вероятность каждого из состояний системы в будущем ( $t > t_0$ ) зависит только от ее состояния в настоящем ( $t = t_0$ ) и не зависит от того, когда и как она пришла в это состояние, т. е. не зависит от ее поведения в прошлом ( $t < t_0$ ). Таким образом, для Марковских процессов будущее зависит от прошлого только через настоящее [9–12].

Состояние массива горных работ при подготовительной выемке угля для предварительного прогноза внезапных выбросов угля и газа можем представить в виде трех состояний:

- возникают условия, возбуждающие процесс появления внезапных выбросов угля и газа;
- происходит отжим от массива в призабойную часть выработки наи-

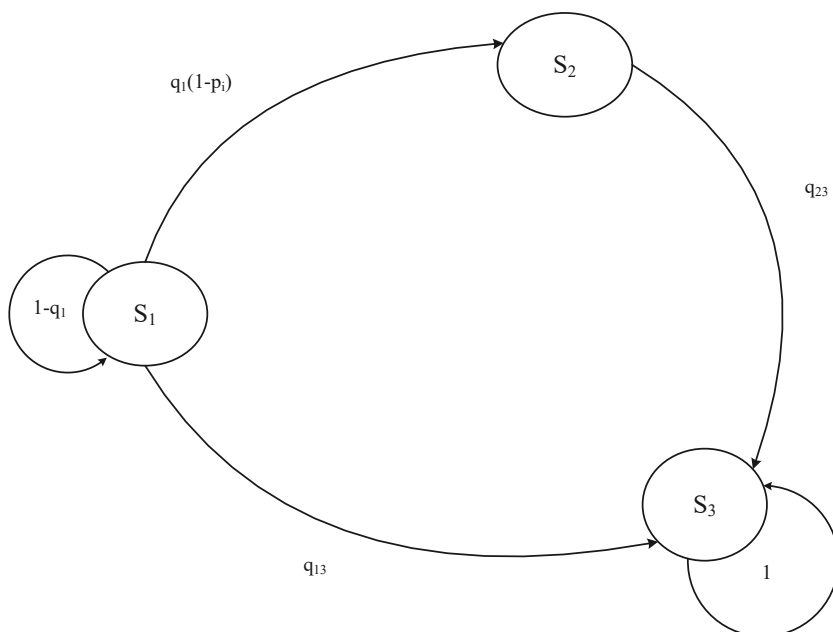


Рис. 2. Диаграмма переходов между состояниями в процессе ведения горных работ  
 Fig. 2. Diagram of transition phases in the course of mining

более разгруженной и дегазированной его части, сопровождающийся разрушением угля и усилением десорбции газа из угля. В случае если развитие явления остановится на стадии начала послынного отделения угля, то произойдет, по меньшей мере, внезапное выдавливание угля с чрезвычайным газовыделением.

Изменение состояния в массиве горных работ в зависимости от длительности его отработки и различных воздействий можем описать семейством Марковских цепей.

Допустимыми стратегиями для Марковских цепей [9–12] являются наборы правил выбора управления по наблюдаемой предыстории в момент  $k$ , т. е. набор всех пройденных состояний  $S_1, S_2$  и т. д.

Адекватность модельного процесса оригиналу здесь понимается в том смысле, что пары  $(S_{i-1}, S_i)$  соседних состояний вдоль траекторий модель-

ного и исходного процессов распределены одинаково.

Для описания процесса моделирования возникновения внезапного выброса угля и газа принимаем следующие обозначения для составления диаграммы состояний (рис. 2):

- $q_1$  — вероятность возникновения условий для процесса внезапного выброса угля и газа;
- $1-q_1$  — вероятность сохранения устойчивого состояния массива горных работ при подготовительной выемке угля;
- $p_i$  — вероятность обнаружения не устойчивого состояния массива горных работ при подготовительной выемке угля;
- $q_{ij}$  — вероятность перехода из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$  в течение дискретного интервала времени;
- $q_{33} = 1$ , состояние  $S_3$ , когда возникает внезапный выброс угля и газа.

Полагаем, что имеется следующее распределение начальных состо-

аний:  $p(0,1)=0,9$ ,  $p(0,2)=0$ ,  $p(0,3)=0$ , т. е. в исходном состоянии при проведении подготовительных горных работ на 90 % в массиве горных пород не наблюдается появления процесса внезапных выбросов угля и газа, а в 10 % процесс начинает возникать.

В соответствии с диаграммой переходов составляем рекуррентные уравнения для распределения вероятностей сохранения определенного состояния в следующий момент времени ( $k+1$ ):

$$\begin{aligned} p(k+1,1) &= 1 - q_1 \cdot p(k,1) + \\ &+ q_1(1 - p(k)) - q_{13} \cdot p(k,1) \\ p(k+1,2) &= q_1 \cdot (1 - p(k)) - \\ &- q_{23} \cdot p(k,2) \\ p(k+1,3) &= 1 - (p(k+1,1) + p(k+1,2)) \end{aligned} \quad (1)$$

При решении данной системы необходимо учитывать, что сумма вероятностных состояний равна единице ( $\sum p_s = 1$ ).

Для определения состояния массива горных пород во время проведения подготовительной выемки угля выбираем две стратегии управления предотвращения внезапного выброса угля и газа:

- при условии, что геотехнологические показатели выбраны адекватно параметрам ведения горных работ;
- при условии возникновения не учтенных показателей при проведении подготовительных горных работ происходит переход из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2$  или в состояние  $S_3$  в неопределенный период.

После задания стратегии, управляемая Марковская цепь становится случайным процессом, распределение вероятностей которого определяется начальным состоянием, матрицей переходных вероятностей и стратегией.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев В. Л. Исследование переходных процессов — новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. Екатеринбург: УрО РАН. — 2019 — 284 с. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311.
2. Осипова И. А. Подход к созданию комплексной модели исследования прогноза внезапных выбросов угля и газа // Горный информационно-аналитический бюллетень.

## Результаты

Для изучения причин возникновения внезапных выбросов угля и газа для конкретного угольного пласта, вводимого в отработку, необходима достоверная информация, не противоречивая с причинно-следственными связями. В связи с этим будет востребована дополнительная информация сейсмоакустического мониторинга состояния горных пород вблизи проходческих выработок. Она может быть выражена в вероятностной модели через еще одну стратегию управления. Модель составлена в первом приближении и требует конкретизации для определенных горно-геологических характеристик угольного пласта.

## Выводы

В статье продемонстрирован один из примеров развития переходных процессов в угледобывающей отрасли, с позиции интеллектуального управления в качестве создания в первом приближении вероятностной модели возникновения внезапных выбросов угля и газа. Создание вероятностной модели позволит конкретизировать данные и знания о процессе ведения проходческих работ, а именно, подойти к решению вопроса о тектонических нарушениях. Попытаться определить, почему при одних и тех же тектонических нарушениях происходят выбросы, а в других случаях — нет. Это решение осложняется выбором стратегии достоверности и уникальностью каждого месторождения.

ть. — 2020. — № 3—1. — С. 170—177. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0-170—177.

3. Рынок антрацита в России: В 2015 году объем добычи вырос на 2 % [Электронный ресурс] // INDEEXBOX Marketing&consulting: [сайт] [2016] URL: <http://www.indexbox.ru/news/v-2015-godu-obem-dobychi-antratsita-vyros/> (дата обращения: 21.02.2020 г.).

4. Валуев А. М., Зайцев А. В. О среднесрочном планировании открытых горных работ на сложноструктурных угольных месторождениях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 2. — С. 287—293.

5. Доклад Александра Новака о Программе развития угольной промышленности на период до 2035 года: [сайт]. URL: <http://government.ru/news/39032/#novak> (дата обращения: 28.02.2020 г.).

6. Яковлев В. Л., Осипова И. А. Переходные процессы при обработке угольного месторождения в свете интеллектуального управления // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — № 4. С.90—96.


7. Зыков В. С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. — Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2010 — 333 с.

8. Зыков В. С. Факторы и свойства горного массива, определяющие вид опасности по геодинамическим явлениям // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2014. — №5 (105) — С. 9—17

9. Puterman L. M. Markov Decision Processes. Wiley. 2019. 643 p.

10. Buffet O. Markov Decision Processes in Artificial Intelligence. Wiley. 2018. 453 p.

11. Kirkwood R. J. Markov processes. CRC Press. 2015. 340 p.

12. Quan-Lin Li Nonlinear Markov processes in big networks / Proceedings of the 24th International Workshop on Matrices and Statistics. — 2016. — 4. — pp. 202 — 217 DOI 10.1515/spma-2016—0019 

## REFERENCES

1. Yakovlev V. L. *Issledovanie perehodnyh processov novoe napravlenie v razvitiu metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Study of transition processes a new direction in the development of a methodology for the integrated development georesources], Ekaterinburg, Institute of Mining, The Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019, 284 p. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311. [In Russ]

2. Osipova I. A. Approach to creating an integrated model for research forecast of extraordinary emissions of coal and gas, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3—1, pp. 170—177. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0-170—177. [In Russ]

3. Anthracite market in Russia: In 2015, production increased by 2 %. INDEEXBOX Marketing&consulting: available at: <http://www.indexbox.ru/news/v-2015-godu-obem-dobychi-antratsita-vyros/> (accessed: 21.02.2020). [In Russ]

4. Valyev A. M., Zajcev A. V. On medium-term planning of open pit mining at complex structural coal deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 2, pp. 287—293. [In Russ]

5. *Doklad Aleksandra Novaka o Programme razvitiya ugol'noj promyshlennosti na period do 2035 goda* [Report of Alexander Novak on the Coal Industry Development Program until 2035], available at: <http://government.ru/news/39032/#novak> (accessed: 28.02.2020). [In Russ]

6. Yakovlev V. L., Osipova I. A. Transient processes during coal deposit development in the light of intelligent control. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta.* 2020, no. 4, pp. 90—96. [In Russ]

7. Zыков V. S. *Vnezapnye vybrosy uglya i gaza i drugie gazodinamicheskie yavleniya v shahtah* [Sudden emissions of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines

Sudden emissions of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines], Kemerovo, Institut uglja i uglekhemii SORAN, 2010, 333 p.[In Russ]

8. Zykov V. S. Factors and properties of the mountain massif, determining the type of hazard by geodynamic phenomena. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014, , no. 5 (105), pp. 9–17 [In Russ]

9. Puterman L. M. Markov Decision Processes. Wiley. 2019. 643 p.

10. Buffet O. Markov Decision Processes in Artificial Intelligence. Wiley. 2018. 453 p.

11. Kirkwood R. J. Markov processes. CRC Press. 2015. 340 p.

12. Quan-Lin Li Nonlinear Markov processes in big networks. *Proceedings of the 24th International Workshop on Matrices and Statistics*. 2016. 4. pp. 202–217 DOI 10.1515/spma-2016–0019.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Осипова Ирина Александровна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник сектора «Управление качеством минерального сырья», Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: minesur@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Osipova I. A., Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Office of the sector Mineral Quality Management, Institute of Mining, The Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, e-mail: minesur@mail.ru.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 01.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 15.12.2020; received after the review 01.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

