

УДК 622.232.8.004.12

DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-8-49-55

**МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА  
РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
РЕАЛЬНОГО ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ**

**ECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF THE REAL PROCESS OF DRILLING**



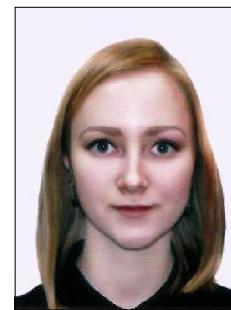
**С. Г. Фролов,**  
Уральский  
государственный  
горный университет,  
г. Екатеринбург  
*igg.ltr@urstu.ru*



**В. Я. Потапов,**  
Уральский  
государственный  
горный университет,  
г. Екатеринбург  
*2cl@inbox.ru*



**В. В. Потапов,**  
Уральский  
государственный  
горный университет,  
г. Екатеринбург  
*gtf.gd@urstu.ru*



**Е. Ю. Колокольцева,**  
Уральский  
государственный  
горный университет,  
г. Екатеринбург  
*ekaterinakolokoltseva@mail.ru*

**S. Frolov,**  
Ural State Mining  
University, Yekaterinburg

**V. Potapov,**  
Ural State Mining  
University, Yekaterinburg

**V. Potapov,**  
Ural State Mining  
University, Yekaterinburg

**E. Kolokoltseva,**  
Ural State Mining  
University, Yekaterinburg

Статья посвящена разработке методики обработки исходных данных об объекте бурения и возможностях технических средств, позволяющей осуществлять достаточно достоверную имитацию реального процесса бурения в его возможности, оценку интегральных геолого-экономических показателей его результативности и на этой основе выбор рациональных технико-технологических решений, в качестве которых рассматривались следующие характеристики: стоимостные параметры бурения, категория буримости, глубина, угол наклона скважины, текущие координаты скважины, мощности пород, слагающих разрез, интенсивность естественного искривления в них скважины, точка подсечения рудного тела. Реализация методики осуществлялась методом имитационного моделирования, в процессе которого определялись возможные варианты, проводился расчет каждого варианта развития и выполнялся сравнительный анализ технико-технологических затрат на проходку буровых скважин. Предложен алгоритм принятия технико-технологических решений согласно многовариантности прохождения буровой скважины. На основании этого производится выбор оптимального варианта бурения, осуществляющийся путем субъективного учета возможных последствий.

Предложенный алгоритм содержит следующие блоки: блок ввода данных об исходной неопределенности объекта и возможностях технического варирирования; блок формирования массива возможных вариантов реализации объекта; блок формирования массива возможных технико-технологических решений; блок определения вероятности реализации конкретного варианта объекта; блок определения требования к результатам бурения; блок определения характеристики форм результатов бурения; блок определения соответствия характеристик материальных форм результата кондиционным требованиям; блок расчета дополнительных затрат на устранение технологического брака определенного вида; блок расчета прямых затрат на реализацию технико-технологического решения.

Использование методики имитационного моделирования позволяет принимать конкретные технико-технологические решения в условиях неопределённости реального объекта

**Ключевые слова:** имитация реального процесса бурения; параметры бурения; методика; блок-схема алгоритма расчета; имитационное моделирование; координаты скважины; мощность пород; результат бурения; глубина; угол наклона

The article is devoted to the development of methods for processing initial data about the drilling object and the capabilities of technical means, allowing for a fairly reliable simulation of the actual drilling process in its capabilities, evaluation of the integrated geological and economic indicators of its effectiveness, and on this basis the choice of rational technical and technological solutions, which were considered the following characteristics: cost parameters of drilling, drillability category, depth, well angle, current well coordinates thickness of rocks, forming the section, intensity of natural curvature of the well in them, point of subsection of the ore body. The implementation of the technique was carried out by the method of simulation, in the course of which possible options were determined; the calculation of each development option was made and a comparative analysis of technical and technological costs for drilling wells was performed. An algorithm for making technical and technological decisions was proposed, according to the multi-variant passage of the borehole. On the basis of this, the choice of the optimal drilling option is made, carried out by subjective consideration of possible consequences.

The proposed algorithm contains the following blocks: a block for entering data about the initial uncertainty of an object and possibilities of technical variation; block forming an array of possible options for the implementation of the object; block forming an array of possible technical and technological solutions; a unit for determining the likelihood of a particular object implementation block definition requirements for drilling results; unit for determining the characteristics of the forms of drilling results; the unit for determining the compliance of the characteristics of the material forms of the result with the conditional requirements; block of calculation of additional costs for the elimination of a technological defect of a certain type; block calculation of the direct costs of the implementation of technical and technological solutions.

The use of simulation techniques allows the authors to make specific technical and technological solutions in the conditions of uncertainty of the real object

**Key words:** imitation of real drilling process; drilling parameters; method; block diagram of calculation algorithm; simulation modeling; well coordinates; rock power; drilling result; depth; tilt angle

---

**Введение.** Особую актуальность проблема выбора рациональных критериев результативности имеет в геологоразведочном бурении, где большое разнообразие, сложность и неопределенность объектов разведки определяет значительную практическую трудность управления ходом работ.

Вовлечение в практику принципиально новых объектов и технико-технологических решений требует разработки методики управления технологическим процессом, учитывающей особенность ведения буровых работ на реальном объекте разведки. Предпосылками такой методики являются, во-первых, развивающаяся в последнее время теория системного анализа технологии разведочного бурения, позволяющая рассматривать технологическую результативность как интегральную характеристику в системе «объект, средства и результат бурения», а во-вторых, достижения в области принятия решений в условиях неопределенности [1-3; 6].

**Методология исследования.** Разработка методики основывалась на предположениях о том, что известны текущие координаты скважины, мощности пород, слагающих разрез, интенсивность есте-

ственного искривления в них скважины, то однозначно может быть определена точка подсечения рудного тела и, соответственно, степень решения геологической задачи.

Если геолого-техническая ситуация (детерминированный вариант реализации объекта) включает характеристики, определяющие стоимостные параметры бурения, то однозначно могут быть определены удельные или общие затраты. Например, если известны категория буримости, глубина, угол наклона скважины и т. д., то расчетным путем может быть определен такой показатель, как стоимость 1 м бурения.

В общем виде геолого-техническая ситуация должна включать геолого-методические характеристики, определяющие требования к результатам бурения (перечень материальных форм, их признаки и параметры).

Характерной особенностью разведочного бурения является обязательное получение необходимого геологического результата, задаваемого требованиями к материальным формам. Несоответствие номенклатуры видов материальных форм, их признаков и параметров, получаемых в

результате бурения, требуемым представляет собой технологический брак и влечет дополнительные действия (а следовательно, и затраты), направленные на устранение или компенсацию брака. В традиционных методиках проектирования не учитываются возможные последствия от невыполнения кондиционных требований. Практически отсутствуют объективные методы сопоставления затрат на реализацию технологического решения, вероятности появления технологического брака, затрат на его устранение. В результате, оптимальными могут признаваться или настолько дорогостоящие решения, что затраты на реализацию несопоставимы с возможными потерями от технологического брака, или решения, реализация которых, несмотря на дешевизну, может привести к значительным потерям. В конечном счете это приводит к нерациональному перерасходу средств. На практике выбор оптимального варианта бурения осуществляется путем субъективного учета возможных последствий (на традиционно-эмпирической основе), но требует значительного опыта и не всегда возможен из-за большого количества анализируемых величин [2; 4; 5].

*Методика исследования.* Основными принципами методики, разработанной на основе общей теории принятия решений [3; 6-8], и, в частности, метода имитационного моделирования, являются следующие положения [10]:

– объективно существующая неопределенность объекта разведки определяет множественность (многовариантность) возможных реализаций его содержания;

– каждый из возможных вариантов реализации объекта однозначно определяет требования к результатам бурения того или иного технико-технологического решения;

– сопоставление необходимых характеристик результатов с получаемыми в деятельности (имитируемыми на модели процесса бурения) однозначно определяет появление того или иного вида технологического брака при реализации анализируемого технико-технологического решения на конкретном варианте объекта;

– однозначный характер варианта объекта позволяет определить затраты при реализации технико-технологического решения – она является суммой прямых затрат и затрат на устранение технологического брака;

– так как реализация конкретного варианта объекта имеет определенную вероятность, то обобщенные затраты для анализируемого технико-технологического решения представляют собой сумму затрат в каждом варианте объекта, умноженных на соответствующую данному варианту вероятность.

Выбор рационально технико-технологического решения из числа анализируемых может осуществляться по следующим критериям:

– обеспечение минимума обобщенных затрат;

– обобщение заданного значения вероятности выполнения геологического задания при минимуме затрат.

Общая блок-схема алгоритма принятия рациональных технико-технологических решений показана на рис. 1 [6].

Блок 1. Начало.

Блок 2. Ввод данных об исходной неопределенности объекта и возможностях технического варьирования. Вводимые интервалы возможных значений содержания характеристик объекта могут быть сколь угодно большими, они лишь отражают существующую на данный момент неопределенность. Кроме того, вводятся данные о распределении плотности вероятности на диапазонах неопределенности вводимых характеристик. Наиболее приемлемым методом задания плотности вероятности является метод [8; 10; 11], при котором по каждой характеристике объекта разведки или результата бурения задаются следующие три оценки, характеризующие возможные значения  $m$ -й характеристики: мода  $M_m$  (наиболее вероятное значение) характеристики  $X_m$ : нижняя  $X_m^1$  и верхняя  $X_m^2$  границы интервала распределения (интервала возможных значений) характеристики  $X_m$ .

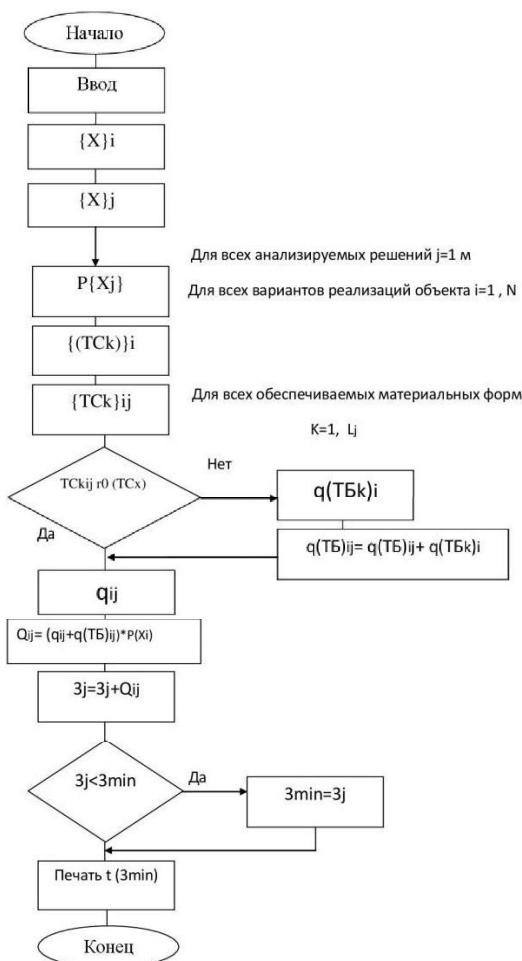


Рис. 1. Алгоритм принятия технико-технологических решений /  
Fig. 1. Algorithm for making technical and technological decisions

На основе этих оценок определяются математическое ожидание  $\bar{X}_m$  и дисперсия значений характеристик  $X_m$  по формулам:

$$\bar{X}_m = \frac{X_m^1 + X_m^2 + 4M_m}{6}, \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{36} (X_m^2 - X_m^1)^2. \quad (2)$$

При расчете математического ожидания и дисперсии значений характеристик  $X_m$  по этим формулам некоторые трудности вызывает необходимость задания значений моды распределения. Поэтому в качестве приближенной плотности распределения характеристик  $X_m$  предлагается использовать бета-распределение вида

$$P^\beta(X_m) = \frac{12}{(X_m^2 - X_m^1)} (X_m - X_m^1) X_m - X_m^2. \quad (3)$$

Распределение  $P^\beta(X_m)$  характеризуется лишь двумя параметрами  $X_m^1$  и  $X_m^2$  и положительным эксцессом и во многих случаях может служить хорошей приближенной оценкой распределения  $P(X_m)$ .

**Блок 3.** Формируется массив возможных вариантов реализации объекта —  $X_i$ . Диапазон возможных значений содержания разбивается на ряд интервалов с малым шагом, из которого формируется комбинация — варианты конкретных геологотехнических ситуаций (рис. 2).

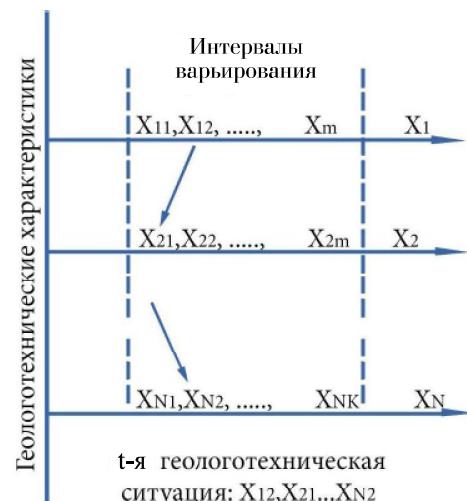


Рис. 2. Схема формирования массива возможных вариантов реализации объекта / Fig. 2. Scheme of an array formation of possible options for the realization of an object

**Блок 4.** Исходя из заданных диапазонов технологического варьирования, с учетом совместности отдельных элементов, формируется массив возможных технико-технологических решений  $\{t\}_j$ .

**Блок 5.** Определяется вероятность реализации конкретного варианта объекта —  $P\{X\}_i$ . Если вариант реализации объекта представляет собой комбинацию независимых характеристик, то его вероятность равна вероятности одновременной реализации составляющих данную комбинацию значений, т. е. произведение отдельных вероятностей

$$P\{X\}_i = \prod_{k=1}^M P(X_{km}), \quad (4)$$

где  $(X_{km})$  – вероятность  $k$ -го значения  $m$ -й характеристики, участвующей в формировании  $i$ -го варианта объекта.

Вероятность реализации конкретного значения той или иной характеристики может быть определена по формуле

$$P(X_{km}) = \int_{k}^{k+1} P(X_m) dX_m, \quad (5)$$

где  $P(X_m)$  – функция плотности вероятности  $m$ -й характеристики. Вид функции плотности вероятности может задаваться как на основе статистической обработки имеющихся данных, так и на основе экспертных оценок (рис. 3а).

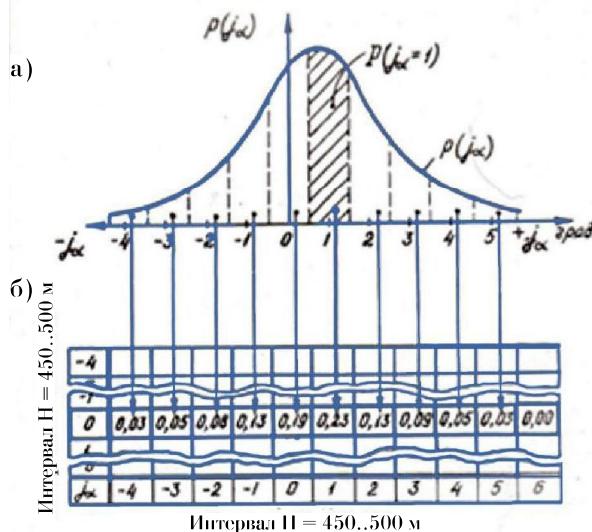


Рис. 3. Схема формирования матрицы переходных вероятностей: а) график распределения плотности вероятности интенсивности естественного азимутального искривления; б) строка матрицы переходных вероятностей / Fig. 3. Diagram of transition probabilities matrix formation: a) graph of probability density distribution for the intensity of natural azimuth curvature; b) matrix row of transition probabilities

Для расчета взаимосвязи разноуровневых характеристик объекта при расчете вероятности используется формула Байеса

$$P(A_j|B_i) = \frac{P(A_i) \prod P(B_i|A_j)}{\sum P(A_i) \prod P(B_i|A_j)}, \quad (6)$$

допускающая формализованное использование геологической информации в процессе разведки. Например, по результатам бурения на Гайском месторождении установлены условные вероятности, связывающие наличие в разрезе определённого типа пород (признак  $B_i$ ) с конкретными значениями интенсивности естественного искривления скважин (параметр  $A_j$ ) –  $P(B_i|A_j)$ . Подставляя последние в формулу (6), можно определить вероятности значения интенсивности искривления, если предыдущими работами установлены (или предполагаются) породы, слагающие разрез.

Учет марковости геолого-технических характеристик осуществляется матрицами условных вероятностей [1; 5; 9]. С целью упрощения процедуры формирования данных матриц используются функции плотности вероятности, выраженные, в частности, бета-распределением. Это позволяет корректно представить в удобной для машинной обработки слабоформализованные и даже интуитивные представления технолога о характеристиках объекта и технологического результата. На рис. 3б показана схема формирования отдельной строки матрицы вероятностей.

Блок 6. Определяются требования к результатам бурения (нормативы качества) –  $\{TC_k\}_i$ . В зависимости от анализируемого на данном этапе уровня технологической организации, требования к результатам бурения могут представлять собой перечень необходимых технологических ситуаций, признаков представительности или их количественных параметров.

Блок 7. Определяются характеристики форм результатов бурения при реализации  $j$ -го технико-технологического решения в условиях  $i$ -го варианта геологического объекта  $\{TC_k\}_{ij}$ .

Блок 8. Определяется соответствие ( $r_0$ ) характеристик материальных форм результата кондиционным требованиям.

Блок 9. Производится расчет дополнительных затрат на устранение технологического брака определенного вида  $q(TB_k)$ . Например, расчет затрат на чистку скважины от смазки «КАВС» при нарушении тре-

бований к открытости ствола (естественное состояние стенок скважины).

Блок 10. Производится расчет прямых затрат на реализацию  $j$ -го технико-технологического решения в условиях, характерных для  $i$ -го варианта геологического объекта —  $q_{ij}$ .

**Заключение.** Целесообразность использования методики имитационного моделирования при управлении процессом бурения объясняется возможностью моде-

лирования характеристик материальных форм результатов бурения при использовании конкретного технико-технологического решения в условиях неопределенности реального объекта. Это дает возможность осуществлять оценку обеспечиваемой технологической результативности и затрат, а следовательно, обеспечивает основу для выбора рационального технологического решения.

### Список литературы

---

1. Майн Х., Осаки Н. Марковские процессы принятия решений. М.: Наука, 1977. 176 с.
2. Ошкордин О. В., Мецгер А. А., Фролов С. Г. Использование марковских цепей при технологическом анализе // Применение математических методов и ЭВМ при обработке информации на геологоразведочных работах: тезисы докладов IV Уральской науч.-практ. конф. Челябинск, 1989. С. 56.
3. Ошкордин С. В., Мецгер А. А. Методика принятия технико-технологических решений в разведочном бурении в неопределенной ситуации // Техника и технология бурения разведочных скважин: сб. Свердловск: СГИ, 1988. С. 50–56.
4. Ошкордин С. В., Мецгер А. А., Фролов С. Г. Принцип алгоритмизации технологического задания и методика принятия технико-технологических решений // Техника и технология бурения скважин на твердые полезные ископаемые: сб. Свердловск: СГИ, 1990. С. 73–77.
5. Ошкордин С. В., Мецгер А. А., Фролов С. Г. Марковость как свойство геологических объектов и ее влияние на выбор технико-технологических решений, обеспечивающих качество буровых работ // Техника и технология бурения скважин на твердые полезные ископаемые: сб. Свердловск: СГИ, 1990. С. 15–21.
6. Фролов С. Г. Методика системного математического моделирования технологического процесса разведочного бурения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.16. Екатеринбург, 1992. 162 с.
7. Харбух Дж., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. М.: Мир, 1974. 319 с.
8. Шарапов И. П. Системный подход к методологическим проблемам в геологии // Методология геологических исследований. Владивосток: ДВИЦ АН СССР, 1976.
9. Шаталин Н. Н. Имитация разведки месторождений в диалоге геолога и ЭВМ // Известия вузов. Геология и разведка. 1981. № 9. С. 90–94.
10. Marius Stan., Lazar Avram. Experimental study on the model of the correlation between the movement of the drilling string with big diameter of drill and effects on the oil rigs // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2015. Vol. 5. Issue 3. P. 295–303.
11. Yan-Li Chena, Tao Shang, Jun-liang Li, Gang Nie, Hang Sui, Xiao-Cui Chen. Evaluation for energy-saving effect of hybrid drilling rig system based on the logic threshold method // Journal of Terramechanics. 2016. Vol. 63. P. 49–60.

### References

---

1. Mein H., Osaki N. *Markovskie protsessy prinyatiya resheniy* (Markov decision processes). Moscow: Science, 1977. 176 p.
2. Oshkordin O. V., Metzger A. A., Frolov S. G. *Primenerie matematicheskikh metodov i EVM pri obrabotke informatsii na geologorazvedochnyh rabotah: tezisy dokladov IV Ural'skoy nauch.-prakt. konf.* (The use of mathematical methods and computers in the processing of information on exploration: abstracts of the IV Ural scientific-practical. conf.). Chelyabinsk, 1989, pp. 56.
3. Oshkordin S. V., Metzger A. A. *Tekhnika i tekhnologiya burenija razvedochnyh skvazhin: sb* (Technique and technology of drilling exploration wells: collected articles). Sverdlovsk: SG1, 1988, pp. 50–56.
4. Oshkordin S. V., Metzger A. A., Frolov S. G. *Tekhnika i tekhnologiya burenija skvazhin na tverdye poleznye iskopaemye: sb.* (Technique and technology of drilling for solid minerals: a collection). Sverdlovsk: SG1, 1990, pp. 73–77.

5. Oshkordin S. V., Metzger A. A., Frolov S. G. *Tekhnika i tekhnologiya burenija skvazhin na tverdye poleznye iskopаемые: sb.* (Technique and technology of drilling for solid minerals: collected articles). Sverdlovsk: SGI, 1990, pp. 15–21.
6. Frolov S. G. *Metodika sistemnogo matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskogo protsessa razvedochchnogo burenija: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.16.* (Methodology of system mathematical modeling of the technological process of exploratory drilling: dis. ... cand. tech. of sciences: 05.13.16.). Yekaterinburg, 1992. 162 p.
7. Harbush J., Bonham-Carter G. *Modelirovanie na EVM v geologii* (Computer modeling in geology). Moscow: World, 1974. 319 p.
8. Sharapov I. P. *Metodologiya geologicheskikh issledovanij* (Methodology of geological research), Vladivostok: Far Eastern Scientific Center Academy of Sciences of the USSR, 1976.
9. Shatalin N. N. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* (News of universities. Geology and exploration), 1981, no. 9, pp. 90–94.
10. Marius Stan., Lazar Avram. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* (Journal of Petroleum Exploration and Production Technology), 2015, vol. 5, no. 3, pp. 295–303.
11. Yan-Li Chena., Tao Shang., Jun-liang Li., Gang Nie., Hang Sui., Xiao-Cui Chen. *Journal of Terramechanics* (Journal of Terramechanics), 2016, vol. 63, pp. 49–60.

### ***Коротко об авторах***

---

**Фролов Сергей Георгиевич**, канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: математическое моделирование  
igg.ttr@ursmu.ru

**Потапов Валентин Яковлевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры горной механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: математическое моделирование  
2c1@inbox.ru

**Потапов Владимир Валентинович**, канд. техн. наук, доцент кафедры горного дела, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: математическое моделирование  
glf.gd@ursmu.ru

**Колокольцева Екатерина Юрьевна**, ассистент, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: математическое моделирование  
ekaterinakolokoltseva@mail.ru

### ***Briefly about the authors***

---

**Sergey Frolov**, candidate of technical sciences, professor, head of Technology and Techniques of Exploration of Mineral Deposits department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: math modeling

**Valentin Potapov**, doctor of technical sciences, professor, Technical Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: math modeling

**Vladimir Potapov**, candidate of technical sciences, associate professor, Mining, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: math modeling

**Ekaterina Kolokoltseva**, assistant, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: math modeling

### ***Образец цитирования***

---

Фролов С. Г., Потапов В. Я., Потапов В. В., Колокольцева Е. Ю. *Методика имитационного моделирования для выбора рациональных технико-технологических решений реального процесса бурения* // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 8. С. 49–55. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-8-49-55.

Frolov S., Potapov V., Potapov V., Kolokoltseva E. *Methodology of imitation modeling for selection of rational technical and technological solutions of the real process of drilling* // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 24, no. 8, pp. 49–55. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-8-49-55.

Статья поступила в редакцию: 30.03.2018 г.  
Статья принята к публикации: 15.10.2018 г.