

УДК 622.02(031)

А.С. Танайно

СОПОСТАВЛЕНИЕ ШКАЛ КЛАССИФИКАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД ПО БУРИМОСТИ

Разрушаемость горных пород в процессе бурения взрывных скважин оценивается буримостью (временем бурения одного метра скважины), трудностью бурения (безразмерным показателем), удельной энергомехностью. С использованием этих показателей в качестве классификационных признаков в настоящее время создан ряд классификаций. Факт наличия различных классификаций, по одному и тому же объекту знаний, уже сам по себе представляет теоретический интерес и, очевидно, свидетельствует как о сложности проблемы, так и не завершенности ее решения.

В данной работе приведены результаты сопоставления шкал классификаций. Необходимость в таких сопоставлениях обусловлена тем, что применительно к шкалам существующих классификаций разработано множество нормативных документов для расчета потребных материальных ресурсов и производительности станков. Однако, ввиду различной детальности представления нормативной базы, часто возникает необходимость в сопоставлении шкал буримости, что затруднительно по причине недостаточной определенности данных, приводимых для этих целей в горнотехнической литературе.

Наиболее широкое применение в горной промышленности получили классификации по буримости, в которых породы классифицируются по длительности основного времени бурения одного метра скважины различными машинами и инструментами. Начиная от ведомственной направленности, постепенно классификации этого типа получили статус общепринятых. Таковыми в настоящее время являются: «Классификация горных

пород СНиП-82» (далее СНиП) и «Единая классификация горных пород по буримости» (далее ЕКБ). В СНиП и ЕКБ все породы по основному времени бурения разделены на разное число групп (категорий): в СНиП на 11; в ЕКБ на 20 [1,2,3].

В представленном виде шкалы классификаций несопоставимы, так как они построены по времени бурения разными станками: в СНиП – по всем породам бурильный молоток ПР-30; в ЕКБ – станок СБР-160 до пород 11 категории, а с 12 и выше – СБШ-250. Для сопоставления шкал необходим единый базовый показатель. В качестве такого показателя используем предел прочности пород при одноосном сжатии (σ_s , МПа). Ориентировочные сопоставления шкал этих классификаций на этой базе приводятся в [2,4], но явно выраженные зависимости для сопоставления в горнотехнической литературе отсутствуют.

При использовании σ_s для сопоставления классификаций необходимо учесть, что не все породы, включенные в классификации, характеризуются показателем прочности на сжатие. А именно, первые четыре категории в СНиП представлены не связанными грунтами (несцементированные обломочные, пески, глинистые, торфа, грунт растительного слоя и др.) и классифицируются по плотности без указания времени основного бурения. В ЕКБ эти грунты представлены в первой, второй и частично в третьей категориях. Поэтому ниже класс дисперсных пород в данной работе не рассматривается, в предположении, что он требует создания специальной классификации по буримости (слишком велика дисперсия показателей свойств этих пород, особенно под влия-

нием криогенных процессов). Дифференциация пород на полускальные и скальные так же затруднена. Согласно [5], условная граница между этими породами принимается по прочности на одноосное сжатие (R_w) в водонасыщенном состоянии: если $R_w \leq 5$ МПа – полускальные, иначе – скальные. Но, ввиду того, что приводимые в горнотехнической литературе результаты испытаний образцов пород выполнены не иначе как в воздушно-сухом состоянии, то ниже полускальные и скальные породы рассматриваются как единая совокупность.

В сопоставлении шкал СНиП и ЕКБ использовался статистический подход. Для чего, из множества публикаций (справочники по физико-механическим свойствам, отдельные статьи, результаты инженерно-геологических исследований по угольным месторождениям и др.), наряду с другими характеристиками, выбирались пределы прочности одноосному сжатию для пород указанных в СНиП и ЕКБ. Полученная базовая выборка дополнялась характеристиками пород, не указанных в классификациях. В результате сформирована выборка (общий объем более 1000 данных), представленная магматическими, метаморфическими, осадочными породами и рудами.

Соответствующий анализ совокупной выборки показал наличие достаточно тесной взаимосвязи между пределом прочности на сжатие (σ_s , МПа) и категориями пород по буримости, описываемые логарифмическими зависимостями:

$$K_c \approx 2.32 \ln(\sigma_s) - (2 \pm 0.25), \\ \sigma_s > 5, R^2 = 0.93 \quad (1)$$

$$K_e \approx 4.85 \ln(\sigma_s) - (8 \pm 0.485), \\ \sigma_s > 5, R^2 = 0.95 \quad (2)$$

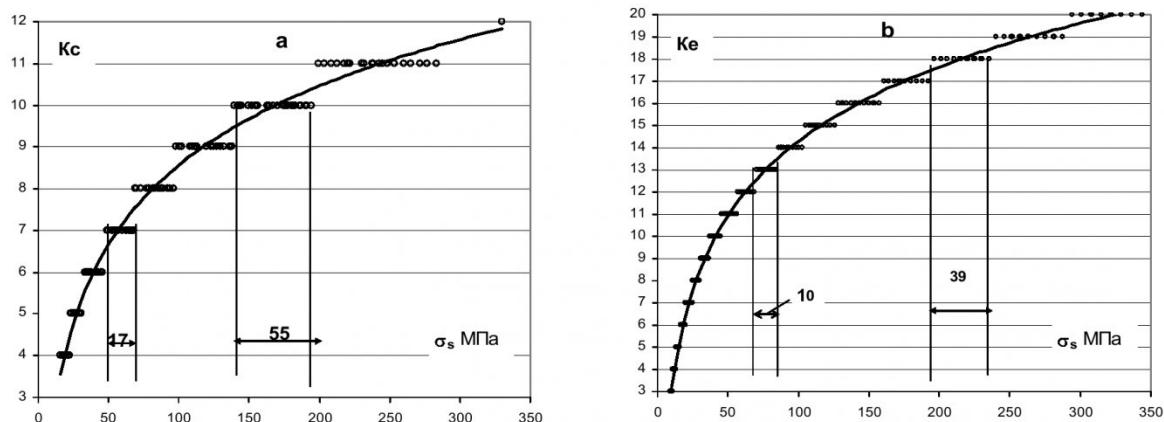


Рис.1. Зависимость категорий пород по буримости от прочности на сжатие в шкалах классификаций СНиП (а) и ЕКБ (б)

где K_c , K_e – категории пород, соответственно в СНиП и ЕКБ.

Здесь и ниже

$R^2 = 1 - D(Y_i - \hat{Y}_i)/D(Y_i)$, где $D(Y_i - \hat{Y}_i)$ – дисперсия отклонения фактических значений от рассчитанных по уравнению тренда; $D(Y_i)$ – дисперсия фактических значений. Следовательно, чем ближе R^2 к единице, тем достовернее характер полученной зависимости.

Используя эту же выборку, получены соотношения обратные (1) и (2), а так же между категориями пород в классификациях

$$\sigma_{sc} \approx 2.9(1 \pm 0.1)\exp(0.44K_c),$$

$$R^2 = 0.95; K_c \geq 4 \quad (3)$$

$$\sigma_{se} \approx 4.15(1 \pm 0.1)\exp(0.224K_e),$$

$$R^2 = 0.96; K_e \geq 3 \quad (4)$$

$$K_e \approx 2.1K_c - (3.8 \pm 0.275) \quad (5)$$

где σ_{sc} , σ_{se} – пределы прочности пород на сжатие (МПа) в классификациях СНиП и ЕКБ

Результаты вычислений по (5) округляются до ближайшего

целого.

Из графической интерпретации (1) и (2) следует, что породы, объединенные в соответствующие категории по буримости, характеризуются размахами значений прочности на сжатие, увеличивающимися с ростом ранга категории (рис.1). Так, в СНиП седьмая категория объединяет группу пород, σ_s которых находится в интервале 50-67, а десятая – 140-195 МПа (рис.1а). Подобная ситуация проявляется и в ЕКБ, но здесь размах значений σ_s существенно ниже (см.рис.1б).

В СНиП и ЕКБ длительность основного времени бурения (t_o) 1 м скважины приводится в зависимости от категорий пород. По рис. 2а можно сопоставить категории пород в обеих классификациях при заданном времени бурения. Например, при $t_o = 8$ мин/м в СНиП породы относятся к 8-ой категории ($6.3 \leq t_o \leq 8.5$ по данным классификации), а в

ЕКБ к 16-ой ($7.12 \leq t_o \leq 8.33$). Важно, что при одном и том же времени бурения прочность пород различна (рис.2б). Так, в СНиП к 8-ой категории относятся породы, прочность на сжатие которых находится в пределах 88-108 МПа а в ЕКБ 126-154 МПа (вычислено по (3) и (4) соответственно).

Следовательно, в представлении классификаций по времени бурения прочностные свойства, которые собственно и определяют характеристики процесса бурения, выражены опосредованно. Поэтому представляют интерес явно выраженные зависимости между временем бурения и прочностью на сжатие. Они получены после соответствующих расчетов по (3), (4) в сопоставлении с (5) и с данными классификаций [2]

$$t_{oc} \approx 0.3715 \exp(0.696\sigma_s) \pm B,$$

$$R^2 = 0.97,$$

$$B = -7 \cdot 10^{-5} \sigma_s^2 + 0.0208\sigma_s - 0.0538,$$

$$6 < \sigma_s \leq 100;$$

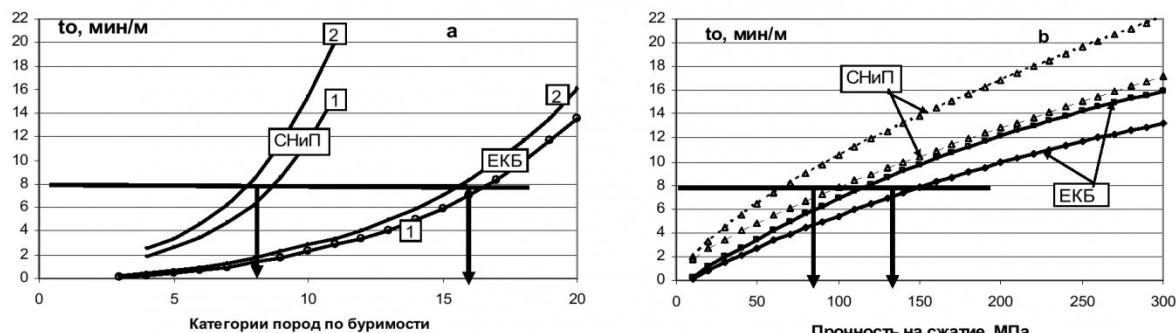


Рис.2. Зависимость основного времени бурения 1 м скважины от категорий пород по буримости (а) и от прочности пород на одноосное сжатие (б): 1,2 – соответственно min, max по СНиП и ЕКБ

$$\begin{aligned} B &= 0.1042 (\sigma_s)^{0.5585}, \sigma_s > 100; \\ t_{oe} &\approx -3.2 \cdot 10^{-4} (\sigma_s)^2 + 0.09\sigma_s - \\ &0.665 \pm 0.007 \sigma_s; \\ R^2 &= 0.97; 6 < \sigma_s \leq 40 \\ t_{oe} &\approx -7 \cdot 10^{-4} (\sigma_s)^2 + 0.07\sigma_s - \\ &0.15 \pm [0.59 \ln(\sigma_s) - 2]; \\ R^2 &= 0.95; \sigma_s > 40, \end{aligned}$$

где t_{oe} , t_{oe} – длительность основного времени бурения (мин/м), соответственно в классификациях СНиП и ЕКБ.

Принципиально иной подход к классификации пород по бурению предложен акад. Ржевским В.В. и д.т.н. Новиком Г.Я. (далее КРиН) [2,6].

Существенное отличие КРиН, от рассмотренных выше, заключается в том, что в ней не учитываются технические средства бурения. Полагается, что решающее значение оказывают прочность на сжатие, сопротивление сдвигу и плотность пород. В результате трудность бурения (термин авторов) оценивается показателем, целое значение которого именуется категорией (K_p) и количественно определяется по выражению

$$K_p = 0.07(\sigma_s + \tau_{sd}) + 0.7\gamma \quad (6)$$

Используя (6), автором данной работы выполнены расчеты по статистической выборке физико-механических свойств пород месторождений цветных металлов, железных руд, угля, строительных материалов и горно-химического сырья. Объем выборки составил более 700 данных, приведенных в литературных источниках. В результате анализа получено уравнение

тренда, позволяющие определить категорию пород по трудности бурения в виде функции от предела прочности на сжатие (рис.3)

$$K_p \approx (0.0815 \pm 0.0025)\sigma_s + 1.8, \quad R^2 = 0.96 \quad \sigma_s > 6 \quad (7)$$

Отклонения результатов, вычисленных по (7), от (6) не превышают $\pm 7\%$. Учитывая, что вариации прочностных свойств пород составляют 20-30%, то вместо выражения (6) для практических целей можно использовать (7), где наличие свободного члена отражает неприменимость (7) для рыхлых пород, характеризуемых не прочностью на сжатие, а сцеплением.

Для наглядности сопоставления, рассмотренных выше классификаций, представим (1), (2), (7) графически (рис.4). Как видно подходы к построению шкал классификаций различаются не только детальностью, но и принципами. В результате чего в одном интервале изменения свойств формируется разное количество категорий. Так на интервале $\sigma_s < 75$ в СНиП выделяется 8 категорий, в ЕКБ – 14, в КРиН – 7. Все породы с $\sigma_s > 175$ в СНиП отнесены к двум (10-11) категориям, в ЕКБ в этом интервале выделяется 4 категории (17-20), в КРиН – 11 категорий.

Поиск классификационных признаков буримости, кроме рассмотренных выше, базируется на оценке работы (энергии) на разрушение породы в забое скважины. Классификация по этому признаку впервые была

предложена для ударно-канатного бурения [7]. С развитием техники, интерес к оценке процесса бурения по затратам энергии заметно оживился, как с целью использования для управления режимами бурения, так и для создания классификаций горных пород.

Одна из таких классификаций предложена И.А. Тангаевым [8], в которой используется взаимосвязь мощности, потребляемой двигателем вращателя (N , кВт), со скоростью бурения (v , м/ч): $e = N/v$, e – удельная энергоемкость бурения, кВт.ч/м. В многочисленных экспериментах, выполненных в производственных условиях, измерялась мощность, потребляемая двигателем вращателя бурового става станка СБШ-250 без учета мощности на вращение его без нагрузки. В результате И.А. Тангаев, взяв в качестве базовой шкалу ЕКБ, дополнил ее значениями удельной энергоемкости в пределах 6-20 категорий [7] (рис.5). В пределах разброса данных взаимосвязь категорий пород по буримости (K_{ew}) и энергоемкостью находится в экспоненциальной зависимости

$$K_{ew} = K_e \approx 5.64 \ln(e) + 1.125 \quad R^2 = 0.9 \quad (8)$$

где e – удельная энергоемкость (МДж/м).

В (8) равенство $K_{ew} = K_e$ означает, что категории пород в классификациях ЕКБ и в дополненной И.А. Тангаевым, идентичны.

Соотношение, обратное (8),

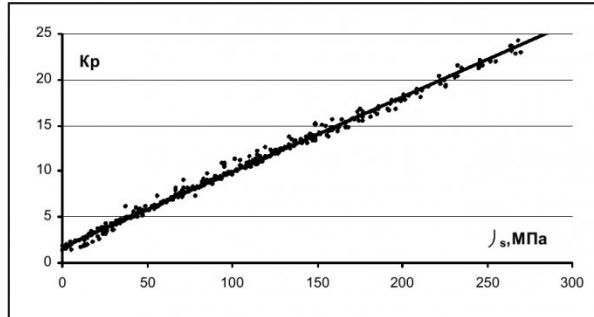


Рис.3. Зависимость категорий пород по трудности бурения от предела прочности на сжатие (в классификации В.В. Ржевского)

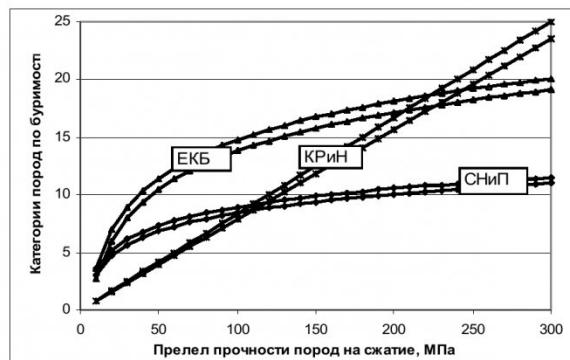


Рис.4. Соотношения шкал в классификациях по буримости

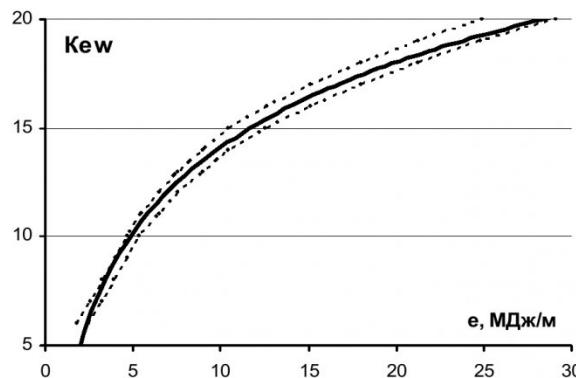


Рис. 5. Характер взаимосвязи удельной энергоемкости с категорией пород по буримости (классификация Тангаева И.А.): точки - данные классификации; сплошная - линия тренда

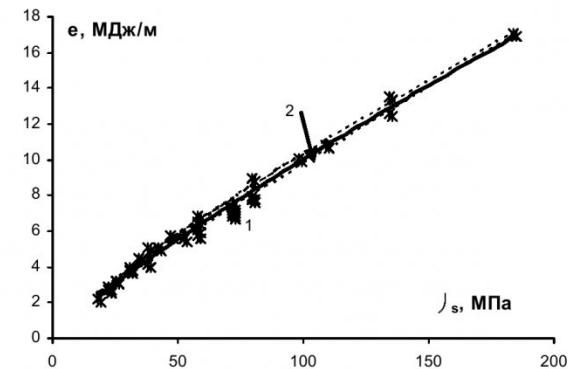


Рис.6. Зависимость удельной энергоемкости бурения от предела прочности пород на сжатие: 1-фактические данные по [9]; 2-тренд по фактическим данным; пунктирная линия -вычислено по (12)

представляется выражением

$$e \approx 0.854 \exp(0.174 K_e), \\ R^2 = 0.9, K_e > 6 \quad (9)$$

Используя (2), путем вычисления по (9), представим зависимость удельной энергоемкости бурения (станок СБШ-250) от предела прочности пород на сжатие

$$e \approx 0.225 (\sigma_s)^{0.83}, \sigma_s > 20; \\ R^2 = 0.95 \quad (10)$$

Для сопоставления (10) с фактическими данными воспользуемся результатами промышленных экспериментов, выполненных И.А. Тангаевым на карьерах с представительным разнообразием физико-технических свойств буримых пород [9, стр. 56]. Уравнение тренда, аппроксимирующее экспериментальные данные, как и (10), описывается степенной зависимостью:

$$e^l \approx 0.198 (\sigma_s)^{0.85}, \text{ МДж/м}, \\ \sigma_s > 20; R^2 = 0.95 \quad (11)$$

Из графической интерпретации (рис.6) следует вполне удовлетворительное согласование (10) с результатами экспериментов (11). Из (11) получим объемную энергию бурения шарошечным долотом диаметром 243 мм

$$e^{lo} \approx 4.24 (\sigma_s)^{0.85}, \text{ МДж/м}^3$$

Особенность (10-11) заключается в том, что по ним определяется энергоемкость разрушения породы только в забое скважины, т.е. без учета затрат энер-

гии на: производство сжатого воздуха, работы гидросистемы, перемещение станка, вспомогательные операции. Эта часть затрат превосходит энергию на разрушение породы в забое в 6-7 и более раз [9].

Точное определение совокупных затрат энергии на технологические операции, составляющие процесс бурения в целом, аналитическими методами невозможен ввиду влияния множества случайно изменяющихся факторов.

На базе фрагментарно собранной информации, а так же с учетом [10,11], получено выражение для оценки совокупной удельной энергоемкости бурения (W_b) станком СБШ-250, как наиболее распространенного на горных предприятиях

$$W_b \approx 1.8 (\sigma_s)^{0.8} \pm (0.05\sigma_s + 2.4), \\ \text{МДж/м}, \\ \sigma_s > 20; R^2 = 0.75. \quad (13)$$

Разброс фактических данных (достоверность их трудно установить) от вычисленных по (13), находится пределах $\pm(1 \div 25\%)$, что отражается в низком значении коэффициента R^2 .

Отметим особенность оценки удельной энергоемкости по (11), (13). По ним определяется энергоемкость бурения по второй штанге, т.е. за пределами зоны разрушения в перебуре. Поэтому некорректно использовать (13) для вычисления сум-

марных затрат энергии на бурение по всей длине скважины, так как с увеличением глубины скважины удельная энергоемкость бурения, на уступе сложенном даже однородными породами, возрастает [8]. Но такое положение характерно и для классификаций, построенных по длительности основного времени бурения, где оно так же непостоянно и при бурении породы с неизменными физико-механическими свойствами по высоте уступа [3]. Аналогичное положение и в классификации КриН, в которой не учитывается увеличение трудоемкости бурения с возрастанием глубины скважины.

Все приведенные выше эмпирические выражения получены в зависимости от наиболее информативного и легко получаемого показателя прочности пород при одноосном сжатии. Но, в силу взаимосвязанности показателей физико-механических свойств, эти выражения можно представить и в зависимости от других показателей, используя соотношения между ними [12].

В частности, в расчетах параметров процесса бурения во многих расчетных схемах используется показатель $(\sigma_{mod}$ МПа) приведенной (динамической) прочности. Независимо от наименования, его определяют соотношением

$\sigma_{\text{мод}} = 0.5(\sigma_s + \sigma_{ck})$,
где σ_{ck} –предел прочности на сдвиг (скол) [2]. Используя указанную в начале данной статьи выборку свойств, получено

$$\sigma_{\text{мод}} \approx 0.58\sigma_s + 4.5 \approx 10.3f - 30;$$

$$(R^2=0.85, \sigma_s > 10 \text{ МПа},$$

где f –коэффициент крепости по М.М. Протодьякову. Здесь и во всех расчетах выше соотношения между σ_s и f определялись по формулам:

$$f = \sigma_s/30 + (\sigma_s/3)^{0.5}$$

(формула Л.И.Барона) и полученной автором в [12]

$$\sigma_s = 150[1 + 0.2f - (1 + 0.4f)^{0.5}].$$

Часто используемая формула $f = 0.1\sigma_s$ приводит к большим ошибкам (до 50%) при переходе от шкалы прочности к шкале М.М.Протодьяконова и наоборот.

Результаты проведенного сопоставления позволяют констатировать:

-несмотря на различие классификационных признаков, используемых в классификациях, по сути, в них прямо или косвенно, отражается влияние прочностных свойств горных пород, что и показано путем сопоставления шкал классификаций по пределу прочности на сжатие;

-геологические наименования пород не являются информативным признаком для построения классификаций по буримости в виду того, что разные по наименованию породы могут иметь равные или сопоставимые количественные характеристики физико-механических свойств,

которые и определяют процесс их разрушения;

-использование показателя «длительность основного времени бурения» в большей мере пригодно для целей нормирования труда в конкретных условиях, чем для построения классификаций, так как слишком велика зависимость результатов от технических характеристик машин, режимов бурения, конструкций инструментов, профессионализма операторов и пр.

На основании представленных выше количественных оценок и сопоставлений приходим к выводу, что существующими классификациями не исчерпывается решение проблемы и, следовательно, актуально их совершенствование, но на базе других подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП IV-2-82. –М.; Стройиздат, 1983.
2. Справочник. Открытые горные работы /К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Виицкий, Н.Н. Мельников и др. -М.: Горное бюро, 1994, 590 с.
3. Симкин Б.А., Кутузов Б.Н., Буткин В.Д. Справочник по бурению на карьерах. –М.: Недра, 1990.
4. Эткин М.Б., Азаркович А.Е. Взрывные работы в энергетическом и промышленном строительстве: Научно-практическое руководство. -М.: Из-во МГГУ, 2004, 317с.
5. Грунты. Классификация. Межгосударственный стандарт. ГОСТ-25100-95.
6. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1984.
7. Зайдман В.Д., Назаров П.П. Классификация горных пород для нормирования ударно-канатного бурения. Горный журнал, 1948, № 7, с. 17-20.
8. Тангаев И.А. Буримость и взрываемость горных пород. – М.: Недра, 1978, 184с.
9. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М.: Недра, 1986, 231с.
10. Рогальский Б.С., Штогрин Е.А., Кушинир И.С. Оценка буримости горных пород на открытых горных разработках. – Горный журнал, 1986, №12.
11. Симкин Б.А., Прокопова В.Г. Оценка способности горных пород к разрушению бурением. – Горный журнал, 1981, №3.
12. Танайно А.С. Структурно-прочностные свойства пород вскрыши угольных месторождений в задачах открытых геотехнологий. Ч. 2: Взаимосвязь показателей прочности горных пород и их классификаций // ФТПРПИ, 2003, № 6.

□ Автор статьи:

Танайно

Александр Савельевич

- канд.техн.наук, ведущий научный
сотрудник (Институт горного дела
СО РАН, г. Новосибирск)