

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.78>КОЭФФИЦИЕНТЫ КРЕПОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ПОРОД
РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

Научная статья

Марков В.С.^{1,*}, Никольский А.М.²¹ORCID : 0009-0004-6469-4141;¹Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К.Аммосова, Якутск, Российская Федерация²Институт горного дела СО РАН им. Н.А. Чинакала, Новосибирск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (marko-valeri[at]mail.ru)

Аннотация

В статье приведена методика определения коэффициента крепости f многолетнемерзлых крупнообломочных пород (МКП) россыпных месторождений криолитозоны (РМК). Расчетными формулами М.М. Протодяконова (старшего) и Л.И. Барона обосновывается необходимость изыскания нового подхода к определению коэффициентов крепости МКП. Изложены основные положения, требования и последовательность отбора оптимальных объемов проб от породного массива очистных и подготовительных горных выработок. Приведена формула для расчета коэффициента крепости МКП с учетом гранулометрического состава пород. При этом, данные для расчета коэффициента крепости МКП можно получить двумя способами: расчетным и экспериментальным. По предлагаемой методике определены значения коэффициентов крепости МКП для россыпных месторождений Якутии, Магаданской области и Чукотки.

Ключевые слова: россыпные месторождения, криолитозона, коэффициент крепости, многолетнемерзлые крупнообломочные породы, заполнитель, твердые включения.

STRENGTH COEFFICIENTS OF PERMAFROST COARSE CLASTIC ROCKS IN PLACER MINES OF THE
CRYOLITIC ZONE

Research article

Markov V.S.^{1,*}, Nikolskii A.M.²¹ORCID : 0009-0004-6469-4141;¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "M. K. Ammosov North-Eastern Federal University",
Yakutsk, Russian Federation²N.A. Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* Corresponding author (marko-valeri[at]mail.ru)

Abstract

The article provides a method for determining the strength coefficient f of permafrost coarse clastic rocks (PCCR) in placer mines of the cryolithozone (PMC). The calculation formulas of M.M. Protodyakonov (Sr.) and L.I. Baron substantiate the need to find a new approach to determining the strength coefficients of PCCR. The main provisions, requirements and sequence for selecting optimal sample volumes from the rock mass of cleaning and preparatory mine workings are outlined. A formula for calculating the strength coefficient of PCCR is given, taking into account the granulometric composition of the rocks. The data for calculating the PCCR strength coefficient can be obtained in two ways: by calculation and by experiment. The proposed methodology was used to determine the values of the PCCR strength coefficients for placer deposits in Yakutia, Magadan Oblast and Chukotka.

Keywords: placer mines, cryolitic zone, strength coefficient, permafrost coarse clastic rocks, filler, solid inclusions.

Введение

В горном деле, при выборе способов и средств разрушения горных пород применяется коэффициент крепости f . Понятие о крепости горных пород ввел более ста лет назад основоположник горной науки д.т.н. профессор М.М. Протодяконов (старший). Коэффициент крепости f это есть относительный показатель, приближенно характеризующий сопротивление горной породы разнообразным, как правило, сложным силовым нагрузкам в различных процессах геотехнологии [1]. В последние годы, в связи с развитием отечественных и зарубежных средств комплексной механизации горного производства, внедрение высокопроизводительных выемочных машин (проходческие и очистные комбайны с режущими исполнительными органами) становится вопросом времени. Основным препятствием повсеместного внедрения комбайнов в условиях РМК является отсутствие достоверного метода определения коэффициента крепости f МКП.

Ниже приводим примеры определения коэффициента крепости f МКП по общеизвестным формулам.

Испытания образцов пород на временное сопротивление одноосному сжатию $\sigma_{сж}^{вр}$, является одним из распространенных методов определения крепости пород, с последующим вычислением f по известной формуле М.М. Протодяконова [1].

Как показали исследования, $\sigma_{сж}$ МКП представленных супесчаным суглинком с галькой и щебнем с включениями кварцевых булыжников при температуре -5° равно 6 МПа [2].

По формуле (1)

$$f = \frac{\sigma_{сж}^{БР}}{10} \dots f = \frac{6}{10} = 0,6 \quad (1)$$

Формула (1) была уточнена Л.И. Бароном и представлена в следующем виде (2):

$$f_B = \frac{\sigma + 10\sigma_1}{60} + \sqrt{\frac{\sigma + 10\sigma_1}{12}} \quad (2)$$

$$f_B = \frac{6 + 10 \cdot 3,7}{60} + \sqrt{\frac{6 + 10 \cdot 3,7}{12}} \approx 2,7$$

где:

σ — временное сопротивление образцов правильной формы одноосному сжатию, МПа;

σ_1 — временное сопротивление образцов неправильной формы одноосному сжатию, МПа.

Рассчитанные по формулам (1) и (2) коэффициенты крепости пород не отражают реальное состояние физико-механических свойств МКП. В этой связи разработка нового подхода определения коэффициента крепости f МКП РМК приобретает актуальное значение.

Целью исследования является определение достоверного значения коэффициента крепости f МКП РМК с учетом относительного процентного содержания мелкодисперсного заполнителя и компонентов крупнообломочных пород, составляющих породный массив.

Литературных источников посвященных определению коэффициента крепости f горных пород на интернет ресурсах достаточно много. Сведения в основном имеют образовательный характер и представлены виде рефератов, авторефератов диссертаций, методических указаний, учебных программ и др. При этом, аналогичных исследований по определению коэффициента крепости f МКП не найдены.

Несмотря на скептическое отношение некоторых исследователей к коэффициенту крепости f по проф. М.М. Протодяконову, его эмпирические формулы, выведенные из данных практики того времени, представляют до сих пор методический интерес. В цитируемой работе для оценки физико-механических свойств горных пород (скальных) предлагают использовать коэффициент крепости по шкале М.М. Протодяконова f определенный косвенными методами [3].

Определение коэффициента крепости f МКП

Образцы МКП для определения коэффициента крепости отбираются с использованием метода бороздового опробования через каждые 8–10 м по длине очистного забоя. Породы, собранные с учетом высоты залегания собирают по отдельности, из которых методом квартования берутся образцы пород весом не менее 5 кг. Последующие операции: взвешивание, высушивание, разделение по фракциям, определение процентного содержания каждой фракции крупнообломочной породы относительно объема образца производятся в лабораторных условиях [5].

Значение коэффициента крепости МКП определяют для мелкодисперсного заполнителя и отдельных составляющих крупнообломочных пород, с учетом их относительного процентного содержания относительно объема образца пород. Коэффициент крепости заполнителя (песок, супесь, суглинок) определяется прямым испытанием на сжатие или при наличии данных ранее проведенных исследований используются их значения с учетом отрицательной температуры и льдистости. По исследованиям ВНИИ-1 «для пород, в которых крупнообломочная фракция составляет менее 70% общего веса скелета породы, прочностные и деформационные свойства определяются только составом заполнителя» [4].

Суммируя коэффициенты крепости заполнителя и отдельных составляющих крупнообломочных пород, получаем значение коэффициента крепости пород f МКП из выражения (3) [5], [6].

$$f_{обп} = \frac{\sigma_{зап}^{сж}}{10} + \left(\frac{\sigma_1^{сж} \cdot n_1}{10} + \dots + \frac{\sigma_n^{сж} \cdot n_n}{10} \right) \quad (3)$$

$$f_{обп} = f_{зап} + (f_1^n + \dots + f_n^n) \cdot a$$

где:

$f_{зап} = \frac{\sigma_{зап}^{сж}}{10}$ — коэффициент крепости заполнителя (песок, супесь, суглинок);

$f_1^n = \frac{\sigma_1^{сж} \cdot n_1}{10}, f_n^n = \frac{\sigma_n^{сж} \cdot n_n}{10}$ — коэффициент крепости МКП отдельных составляющих испытываемого образца;

$\sigma_{зап}^{сж}, \sigma_1^{сж}, \sigma_n^{сж}$ — временное сопротивление на одноосное сжатие соответственно заполнителя, 1-й и n-й фракции МКП, составляющих испытываемый образец;

$n_1 \dots n_n$ — относительное процентное содержание 1-й и n-й фракции МКП относительно объема образца.

Методические указания по определению $\sigma_{зап}^{сж}, \sigma_1^{сж}, \sigma_n^{сж}$, составляющих испытываемый образец приведены в [7], [8], [9], [10].

Коэффициент крепости f МКП можно определить двумя способами: расчетным и экспериментальным. При расчетном способе значение коэффициента крепости определяется по формуле (3), используя данные геологических отчетов, отчетов научно-исследовательских институтов по исследованию физико-механических свойств горных пород и справочные материалы прочностных свойств горных пород [2], [4], [9], [11].

Таблица 1 - Физико-механические свойства и расчетные значения крепости МКП

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.78.1>

Наименование пород	Температура пород, °С	Влажность, %	Гран. состав, мм	Временное сопротивление на одноосное сжатие, МПа	Содержание в долях единицы	f	
						По Протодюкову	По предлагаемой методике
Супесчаный суглинок (заполнитель)	- 5°	15	<2	6	0,5	0,6	0,6
Галька, щебень песчанистых сланцев (твердые включения)	- 5°	5	10-50	60	0,4	-	2,4
Кварцевые булыжники (твердые включения)	- 5°	-	50-100	200	0,1	-	2
Итого						0,6	5

Из таблицы 1 видно, что f заполнителя (супесчаный суглинок) равен 0,6.

Далее определяем коэффициенты крепости твердых включений по формуле (3) с учетом данных приведенных в таблице 1. В результате получим значение коэффициента крепости для МКП $f=5$.

При экспериментальном способе, в шахтных или лабораторных условиях определяют значения коэффициента крепости f МКП отдельных твердых включений методом толчения с помощью прибора для определения крепости (ПОК), разработанным проф. М.М. Протодюковым (младшим) [10]. Метод рекомендован для повсеместного использования в горной промышленности. ГОСТ 21153.1-75* Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодюкову.

В таблице 2 приведены значения коэффициентов крепости МКП месторождения «Кристалл – Конечный» прибором ПОК.

Таблица 2 - Физико-механические свойства и экспериментальные значения крепости МКП

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.78.2>

Наименование пород	Температура пород, °С	Влажность, %	Гран. состав, мм	Временное сопротивление на одноосное сжатие, МПа	f (ПОК)	Содержание в долях единицы	f	
							По Протодюкову	По предлагаемой методике
Супесчаный суглинок (заполнитель)	- 7°	15	<2	0,6	-	0,53	0,6	0,6
Гравий (твердые включения)	- 7	-	2-10	-	6	0,29	-	1,74
Галька средне мелкая (твердые включения)	- 7	-	10-50	-	6	0,19	-	1,14
Галька	- 7	-	50-80	-	16	0,01	-	0,16

Наименование пород	Температура пород, °С	Влажность, %	Гран. состав, мм	Временное сопротивление на одноосное	f (ПОК)	Содержание в долях единицы	f	
							По Протодак онову	По предлагаемой методике
кварцевая (твердые включения)								
Булыжник и кварцевые (твердые включения)	- 7	-	>80	-	18	0,004	-	0,08
Итого							0,6	3,7

В результате получим значение коэффициента крепости МКП $f=3,7$.

Достоверность полученных результатов подтверждается показателями крепости горных пород, приведенными в «Единые нормы выработки и времени на подземные очистные, и горнопроходческие и нарезные горные работы. В 2-х ч. 1: сборник / НИИ труда. – М.:НИИ труда, 1984» (ЕНВ и В).

Коэффициенты крепости пород $f=4-5$ отнесены к VI-X категории [12].

Таблица 3 - Классификация горных пород по ЕНВ и В 1984 г.

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.78.3>

Наименование классификации	Категория пород							
	V	VI-X	XI-XII	XIII-XIV	XV	XVI-XVII	XVIII	XIV-XX
ЕНВ и В. 1984 г.								
f	4	4-5	6-8	8-10	12-15	16	18	20

Обсуждение результатов

Значения коэффициентов крепости f МКП по вышеприведенной методике россыпных месторождений Якутии, Магаданской области и Чукотки приведены на рис. 2. Значения крепости МКП месторождений Кулара: Кыра-Онкучах (шахта № 11), Суор-Уйалаах (шахта № 20 «бис»), Этиннээх (шахта № 64), Суор-Уйалаах (шахта № 65), Этиннээх (шахта № 68), Батор урэгэ (шахта № 15), Кристалл — Конечный (шахта № 1) определены в шахтных условиях экспериментальным способом с помощью прибора ПОК. Другие значения крепости МКП определены расчетным способом согласно выше приведенной методике по данным отчетов изысканий геологических партий или данных опубликованных источников.

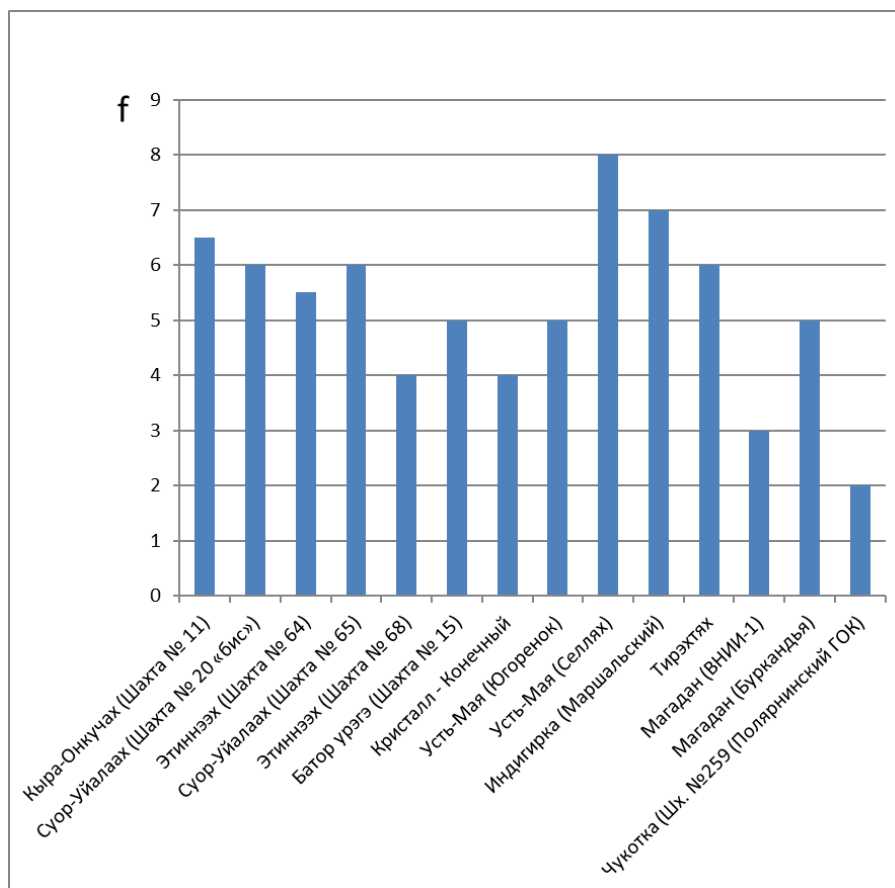


Рисунок 1 - Коэффициенты крепости f МКП
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.78.4>

Анализ исследований значений коэффициентов крепости МКП, проведенных на РМК показали следующее:

- породообразующими компонентами МКП с различными процентными соотношениями являются: заполнитель (песок, супесь, суглинок и глины); гравийно-галечниковые породы (щебень и галька глинистых и песчаных сланцев); булыжники и валуны кварцевого состава;

- ввиду большой неоднородности литологического состава пород, слагающих россыпи, влажность (льдистость) их колеблется в широких пределах (от 6% до 30%). Максимальная влажность — 28–32% отмечается в супесчано-суглинистых породах (супеси, суглинки), в песчаных породах влажность составляет 20–25%, в гравийно-галечных отложениях сцементированных песчано-глинистым заполнителем, влажность составляет в среднем 19–25%; наименьшей влажностью характеризуются коренные породы — глинистые сланцы — 6%;

- значения коэффициентов крепости россыпных месторождений Кулара изменяются от $f=4$ (Кристалл-Конечный) до $f=6,5$ (Кыра-Онкучах). Мелкозернистый заполнитель находится в пределах от 20% до 62,5%, а твердые крупнообломочные включения составляют от 37,5% до 80%, в том числе валунистость изменяется от 0,42% до 11,4%. На россыпных месторождениях «Югоренск» и «Тирехтах» коэффициенты крепости соответственно равны $f=5$ и $f=6$. Наибольшее значение коэффициента крепости определено на месторождении «Селлях» (Усть-Мая) - $f=8$, а наименьшее «Шахта № 259» (Чукотка) - $f=2$.

Исследования гранулометрического состава пород кровли и продуктивного пласта РМК показали следующее соотношение фракций: 200 мм и выше 0,3–11,4% (булыжники и валуны); 10 мм и выше 20–40%; от 2 до 10 мм 15–40% (гравийно-галечниковые породы); менее 2 мм 17 — 62, 5% (заполнитель).

Исследования, связанные с геологическим строением и минеральным составом пород РМК, определением структуры, текстуры, гранулометрического состава МКП по определению коэффициента крепости МКП необходимо проводить совместно с геологической службой горнодобывающего предприятия.

Заключение

Рекомендуемый способ определения коэффициента крепости f МКП способствует выбору средств и способов разрушения горных пород при подземной разработке РМК в стадии проектирования.

Метод подхода определения коэффициента крепости f МКП не вступает в противоречие с общепризнанным методом определения коэффициентов крепости f по М.М. Протоdjаконову, а расширяет область его применения в условиях подземной разработки РМК.

Методика также может быть использована геологами в стадии разведки РМК для уточнения нормирования и оплаты труда трудоемких ручных работ проходки шурфов и выборе средств разрушения при проведении горно-разведочных выработок.

Дальнейшие исследования по изучению и сбору данных физико-механических свойств МКП необходимы для установления рациональной области применения различных типов горнодобывающего оборудования в условиях РМК.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Барон Л.И. Коэффициенты крепости горных пород / Л.И. Барон. — Москва: Наука, 1972. — 175 с.
2. Марков В.С. Результаты испытаний физико-механических свойств пород многолетнемерзлых россыпей Кулара в природных условиях / В.С. Марков // Колыма. — 1986. — № 11. — С. 11–13.
3. Авдеев А.Н. Оценка коэффициента крепости горных пород косвенными методами / А.Н. Авдеев, Е.Л. Сосновская, А.Ю. Болотнев // Известия вузов. Горный журнал. — 2021. — № 3. — С. 28–35. — DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-28-35
4. Тайбашев В.Н. Физико-механические свойства крупнообломочных пород / В.Н. Тайбашев // Труды ВНИИ-1. — 1973. — Т. 33. — 150 с.
5. Альбов М.Н. Опробование месторождений полезных ископаемых / М.Н. Альбов. — Москва: Недра, 1975. — 231 с.
6. Пат. 2189442 Российская Федерация, МПК E21C 39/00. Способ определения коэффициента крепости многолетнемерзлых крупнообломочных пород / В.С. Марков, В.К. Елшин, В.А. Шерстов; заявитель Институт горного дела Севера СО РАН. — № 2000123993/03 ; заявл. 19.09.2000 ; опубл. 10.09.2002. — 7 с.
7. Марков В.С. Методика определения коэффициента крепости многолетнемерзлых крупнообломочных пород / В.С. Марков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2006. — № 12. — С. 355–359.
8. Рекомендации по комплексу методов определения механических свойств горных пород (для инженерных расчетов горного давления). — Ленинград: ВНИМИ, 1980. — 104 с.
9. Ильницкий Е.И. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкий, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин. — Москва: Недра, 1969. — 392 с.
10. ГОСТ 21153.1-75. Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодакинову. — Взамен ГОСТ 21153.1-73. — Введ. 1976-01-01.
11. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. — Москва: Недра, 1975. — 279 с.
12. Единые нормы выработки и времени на подземные очистные, и горнопроходческие и нарезные горные работы. В 2-х ч. Ч. 1: сборник / НИИ труда. — Москва: НИИ труда, 1984. — 424 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Baron L.I. Koehfficienty kreposti gornyh porod [Strength coefficients of rocks] / L.I. Baron. — Moscow: Nauka, 1972. — 175 p. [in Russian]
2. Markov V.S. Rezul'taty ispytaniy fiziko-mekhanicheskikh svojstv porod mnogoletnemerzlykh rossypej Kulara v natural'nykh usloviyakh [Results of tests of physico-mechanical properties of permafrost placer rocks of Kulara in natural conditions] / V.S. Markov // Kolyma. — 1986. — № 11. — P. 11–13. [in Russian]
3. Avdeev A.N. Ocenka koehfficienta kreposti gornyh porod kosvennymi metodami [Assessment of rock strength coefficient by indirect methods] / A.N. Avdeev, E.L. Sosnovskaja, A.Ju. Bolotnev // Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. — 2021. — № 3. — P. 28–35. — DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-28-35. [in Russian]
4. Tajbashev V.N. Fiziko-mekhanicheskie svojstva krupnooblomochnykh porod [Physico-mechanical properties of coarse-grained rocks] / V.N. Tajbashev // Trudy VNII-1 [Proceedings of VNII-1]. — 1973. — Vol. 33. — 150 p. [in Russian]
5. Al'bow M.N. Oprobovanie mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh [Sampling of mineral deposits] / M.N. Al'bow. — Moscow: Nedra, 1975. — 231 p. [in Russian]
6. Pat. 2189442 Rossijskaja Federacija, MPK E21S 39/00. Sposob opredelenija koehfficienta kreposti mnogoletnemerzlykh krupnooblomochnykh porod [Method for determining the strength coefficient of permafrost coarse-grained rocks] / V.S. Markov, V.K. Elshin, V.A. Sherstov; Applicant: Northern Mining Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. — № 2000123993/03 ; filed 19.09.2000 ; publ. 10.09.2002. — 7 p. [in Russian]
7. Markov V.S. Metodika opredelenija koehfficienta kreposti mnogoletnemerzlykh krupnooblomochnykh porod [Methodology for determining the strength coefficient of permafrost coarse-grained rocks] / V.S. Markov // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]. — 2006. — № 12. — P. 355–359. [in Russian]
8. Rekomendacii po kompleksu metodov opredelenija mekhanicheskikh svojstv gornyh porod (dlja inzhenernykh raschetov gornogo davlenija) [Recommendations for a set of methods for determining the mechanical properties of rocks (for engineering calculations of rock pressure)]. — Leningrad: VNIMI, 1980. — 104 p. [in Russian]
9. Il'nickij E.I. Svojstva gornyh porod i metody ih opredelenija [Properties of rocks and methods for their determination] / E.I. Il'nickij, R.I. Teder, E.S. Vatin. — Moscow: Nedra, 1969. — 392 p. [in Russian]

10. GOST 21153.1-75. Porody gornye. Metod opredelenija koehfficienta kreposti po Protod'jakonovu [GOST 21153.1-75. Rocks. Method for determining the Protodyakonov strength coefficient]. — Introd. 1976-01-01. [in Russian]
11. Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svojstv gornyh porod [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks]. — Moscow: Nedra, 1975. — 279 p. [in Russian]
12. Edinye normy vyrabotki i vremeni na podzemnye ochistnye, i gornoprophodcheskie i nareznye gornye raboty. V 2-h ch. Ch. 1: sbornik [Unified production rates and time standards for underground stoping, mining, and development works. In 2 parts. Part 1: collection] / NII truda. — Moscow: Labour Research Institute, 1984. — 424 p. [in Russian]