

УДК 622.2; 622.235

В. А. Еременко, В. М. Жигалкин, А. В. Потапов, В. В. Атанов
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ГОРНЫХ ПОРОД НА ЖДАНОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Приведены результаты исследования физико-механических и динамических характеристик горных пород Ждановского месторождения. Экспериментально установлены закономерности упруго-пластического деформирования горных пород. Определены пределы прочности горных пород на сжатие и растяжение, модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Ключевые слова: физико-механические свойства, горные породы, образец, напряжение, деформация, предел прочности, скважина.

Переход с открытого на подземный способ разработки месторождения сопровождается увеличением напряжений в массиве и усложнением технологии очистных работ. В этой связи исследования по определению физико-механических и динамических характеристик горных пород на Ждановском месторождении, расположенном в сейсмоактивном районе Кольского полуострова, являются актуальными.

Опыт, накопленный в результате многочисленных исследований горных пород на рудных месторождениях России, свидетельствует о сравнительно большой зависимости прочностных и деформационных характеристик от вида напряженного состояния. Особенно большое влияние на эти характеристики оказывает всестороннее сжатие.

Методическая сложность экспериментов по изучению свойств пород при динамическом нагружении и потребность в большом числе образцов для проведения цикла испытаний определили особый подход к выбору

пород для решения поставленной задачи — исследования физико-механических и динамических характеристик горных пород на гор. –20ч – 110 м Юго-Западного рудного тела (ЮЗРТ); на гор. –230 м Центрального рудного тела (ЦРТ).

Проведены испытания следующих образцов горных пород: габбро-диабазов, пиллит песчаника, брекчированного перидотита, массивной руды, густовкрапленного перидотита, густовкрапленной сульфидной руды, перидотита с мелкой вкрапленностью сульфида и перидотита, на одноосное сжатие при скорости нагружения 0,1 и 1 мм/мин. Всего было поставлено 33 эксперимента. Цилиндрический образец непосредственно помещался между плитами пресса, где затем производилась подача заданного осевого перемещения. При этом предварительно задавались граничные условия на торцах, которые подразделялись на: а) сухое трение, имеющее место при непосредственном контакте образца с плитами испытательного оборудования; б) пониженное трение,

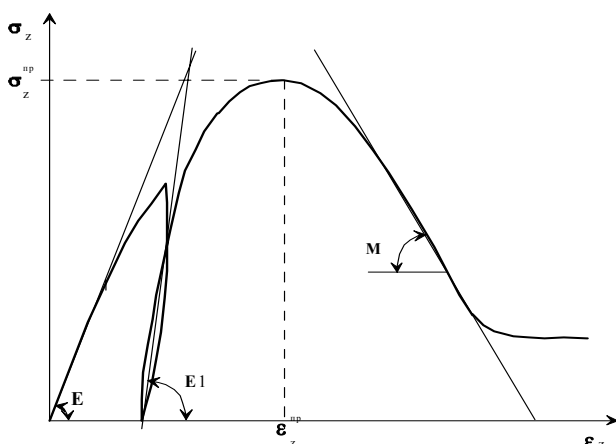


Рис. 1. Схема к определению прочностных и деформационных характеристик горных пород

контакт образца с плитами осуществлялся через тонкую фторопластовую прокладку.

Испытательное оборудование обеспечивало жесткий режим нагружения и автоматическую запись в память компьютера результатов эксперимента с построением диаграмм деформирования «осевое напряжение - осевая деформация», «осевое напряжение - поперечная деформация» (сервогидравлический пресс фирмы «Instron» с предельной нагрузкой 350 кН и жесткостью $2 \cdot 10^8$ Н/м). Выбор размеров образцов и точность их обработки соответствовали требованиям ГОСТов [1-3]. Диаметр образцов 31,5 мм, высота — 62 мм и более.

По результатам проведенных испытаний на одноосное сжатие требовалось:

- построить диаграммы деформирования «осевое напряжение - осевая деформация»;

- определить основные физико-механические характеристики: предел прочности σ_z^{np} , осевая деформация ε_z^{np} , соответствующая пределу прочности, поперечная деформация ε_r^{np} , соответствующая пределу прочности,

модуль Юнга E (E_1), коэффициент Пуассона ν , модуль спада M , проанализировать зависимости вышеперечисленных характеристик от коэффициента формы образцов и скорости деформации (или перемещения захватов испытательного пресса) и др.

Строились диаграммы « $\sigma_z - \varepsilon_z$ ». После чего прочностные и деформационные характеристики горных пород в случае экспериментов на одноосное сжатие определялись по

схеме представленной на рис. 1.

Определение предела прочности σ_z^{np} проводилось в соответствии с ГОСТом [3]. Сущность метода заключается в измерении максимальной разрушающей нагрузки при нагружении образца между стальными плоскими плитами. Предел прочности для каждого образца рассчитывался по формуле:

$$\sigma_z^{np} = \frac{P_{np}}{S} \cdot 10 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где P_{np} — разрушающая нагрузка, Н; S — площадь поперечного сечения образца, мм^2 .

Модуль упругости определялся в этой работе двумя методами:

1) Модуль упругости E определялся по линейной части начальной нагрузочной ветви диаграммы деформирования:

$$E = \frac{\sigma_n - \sigma_k}{\varepsilon_n - \varepsilon_k}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где σ_n, σ_k — напряжения, соответствующие начальной и конечной точкам линейного участка нагрузочной ветви кривой деформирования; $\varepsilon_n, \varepsilon_k$ — осевые деформации, соответствующие напряжениям σ_n, σ_k .

2) Модуль упругости E_1 определялся по линейной части разгрузочной ветви диаграммы деформирования,

$$E_1 = \frac{\sigma_n - \sigma_k}{\varepsilon_n - \varepsilon_k}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где σ_k, σ_n — напряжения, соответствующие начальной и конечной точкам линейного участка разгрузочной ветви кривой деформирования; $\varepsilon_k, \varepsilon_n$ — продольные деформации, соответствующие напряжениям σ_k, σ_n .

Коэффициент Пуассона ν определялся по результатам испытаний образцов горных пород при сжатии как отношение поперечной деформации образца к продольной деформации:

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_z}, \quad (4)$$

где ε_r — поперечная деформация образца, определяемая из выражения

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta d}{d}, \quad (5)$$

где Δd — абсолютная поперечная деформация образца, мм; d — диаметр испытываемого образца, мм; ε_z — осевая деформация образца:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta h}{h}, \quad (6)$$

где Δh — относительная осевая деформация образца, мм; h — высота образца, мм.

Как видно из рис. 1, запредельная ветвь диаграммы $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ часто имеет прямолинейный характер, наклон прямой характеризуется модулем спада M . Модуль спада определялся по линейному участку ниспадающей (запредельной) ветви диаграммы деформирования:

$$M = \frac{\sigma_n - \sigma_k}{\varepsilon_n - \varepsilon_k}, \text{ МПа}, \quad (7)$$

где σ_n, σ_k — напряжения, соответствующие начальной и конечной точкам линейного участка запредельной вет-

ви диаграммы; $\varepsilon_n, \varepsilon_k$ — продольные деформации, соответствующие напряжениям σ_n, σ_k .

Для каждой серии экспериментов определялось среднее отклонение механических характеристик как:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|, \quad (8)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ — среднеарифметическое значение измеряемой величины; и определялся коэффициент вариации как:

$$K = \frac{\bar{S}}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

На одноосное сжатие испытано 19 образцов и на растяжение — 14.

Исследования, как отмечено выше, проводились на образцах из керна диаметром 31,5 мм, полученного на глубинах от 15 до 61 м при бурении скважин (рис. 2, табл.).

В результате проведенных исследований были выявлены две группы, в пределах которых изменялись величины предела прочности пород на сжатие: 3, 4, 6, 7, 8, 10, 2, 3а, 4а, 5а, 7а и 8а, а также 1, 5, 11, 13 и 6а (рис. 3). В первой группе предел прочности пород на сжатие $[\sigma_{сж}]$ колебался от 25,5 до 93,9 МПа, во второй — от 115,4 до 182,6 МПа. Минимальный $[\sigma_{сж}]$, равный 25,5-72,5; 48,5-80; 48,7 и 58,6 МПа, соответственно, у перидотита; сульфидной руды, песчаника, густовкрапленной сульфидной руды. Максимальный $[\sigma_{сж}]$, равный 115,4-182,6; 130; 145,5 МПа — у габбро-диабазы; перидотита; сульфидной руды; перидотита с сульфидной минерализацией.

Следует отметить, что при испытании образцов из керна, находящегося на различных глубинах в скважине, предел прочности $[\sigma_{сж}]$ у габбро-диабазы на расстояниях от устья

п/п	Порода	Разрез, направление, скважины, глубина от устья скважины	Район отбора образцов	Особенности микроструктуры образца
1	Габбро-диабаз	р. 19+12, 18, горизонтальная, азимут 7 ⁰ , 15 м	ЮЗРТ, гор. -20 м, полевой штрек, геологическая ниша	Микрозернистый, серый с зеленым оттенком, средней трещиноватости, трещины под углом 45 ⁰ к оси керна
2	Пиллит, песчаник	22 м	- // -	Тонкозернистый, серый и темно серый, слоистость под углом 45 ⁰ к оси керна, средняя трещиноватость, ориентированная по направлению слоистости
3, 3а	Брекчированный перидотит	31,3 м	- // -	Сильно трещиноватый, направление трещин хаотичное, трещины заполнены сульфидным материалом, количество сульфидных к основной массе 50-60%
4, 4а	Массивная руда сульфидная	31,9 м	- // -	—
5, 5а	Густовкрапленные сульфидные руды (серая руда)	39,2 м	- // -	—
6, 6а	Густовкрапленный перидотит	45,7 м	- // -	—
7, 7а	Перидотит с мелкой рудой и вкрапленностью сульфида	53,7 м	- // -	—
8, 8а	Габбро-диабаз	р. 14+10, горизонтальная, азимут 24 ⁰ , 10 м	ЮЗРТ, гор. -110 м, полевой штрек	Мелкозернистый, серый, средняя трещиноватость
9, 9а	Габбро-диабаз	15 м		—
10	Габбро-диабаз	20 м		
11	Габбро-диабаз	скв. -230/-63, горизонтальная, азимут 30 ⁰ ; 15 м	ЦРТ гор. -230 м	Средняя зернистость и трещиноватость
12	Перидотит с разовой сульфидной минерализацией	39 м	гор. -230 м	Среднезернистый, массивный, средней трещиноватости
13	Перидотит с розовой сульфидной минерализацией	61 м	- // -	Вкрапленного типа, массивный, средней зернистости и трещиноватости

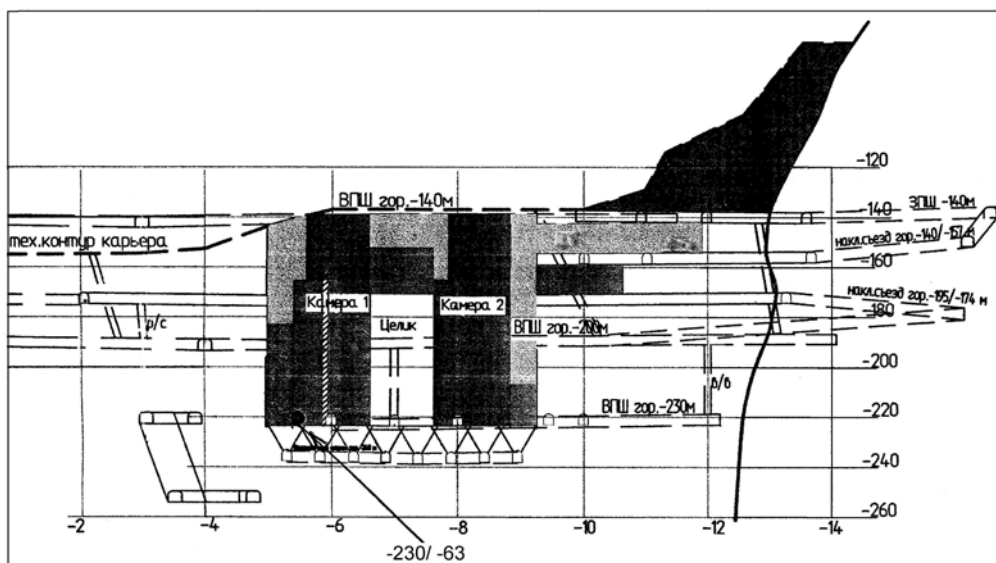


Рис. 2. Местоположение керновой скважины (-230/-63) в шахтном поле. ВПШ и ЗПШ — восточный и западный полевые штореки; -2÷-14 — разрезы; -120 ÷ -260 м — горизонты

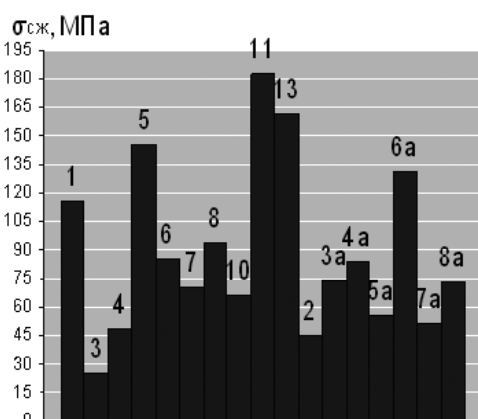


Рис. 3. Диаграмма распределения предела прочности горных пород при одноосном сжатии. 1-13 — типы горных пород (см. табл.)

скважины до места отбора проб, равных 10 (15)-20 м, изменялся от 93,9 до 115,6 (182,6) МПа. У перидотита — от 31,3 до 61 м, $[\sigma_{сж}]$ изменялся от 25,5-72,5; 70,8; 161,3 МПа. Среднее значение $[\sigma_{сж}]$ горных пород составило 96 МПа.

Предел прочности горных пород на растяжение выявлялся на основании экспериментальных исследований, полученных при испытании образцов, и определялся в соответствии с полученной характеристикой (рис. 1, 4).

Установлено, что предел прочности горных пород на растяжение $[\sigma_{раст.}]$ колебался от 5,9 до 14,9 МПа, причем минимальный $[\sigma_{раст.}]$ получен при испытании габбро-диабазы, максимальный — густовкрапленной сульфидной руды (рис. 5). Высокие значения $[\sigma_{раст.}]$ у песчаника, перидотита и габбро-диабазы. Среднее значение $[\sigma_{раст.}]$ горных пород составляло 9,8 МПа.

Диаграммы «напряжение-деформации» являются основным экспериментальным материалом, который подвергается дальнейшему анализу для получения более полной инструкции о механических свойствах исследованных образцов горных пород.

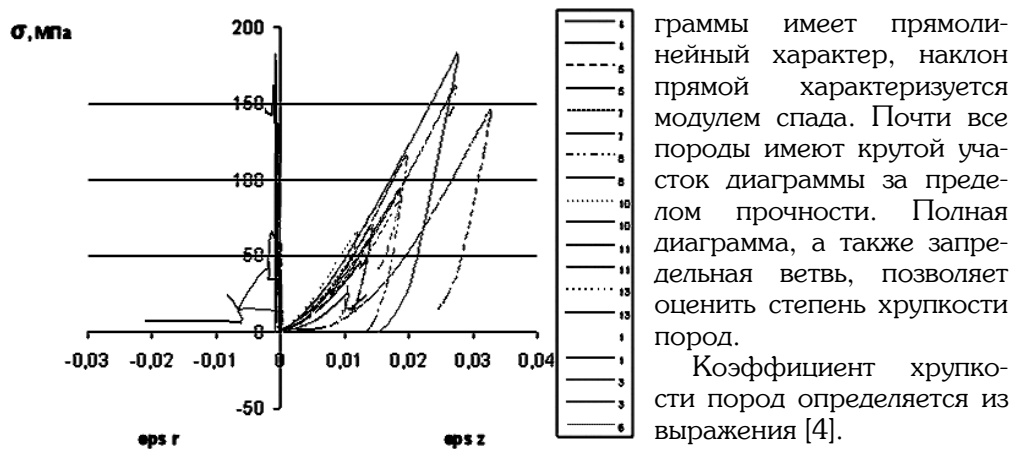


Рис. 4. Прочностные и деформационные характеристики горных пород. 1-13 — типы горных пород (см. табл.)

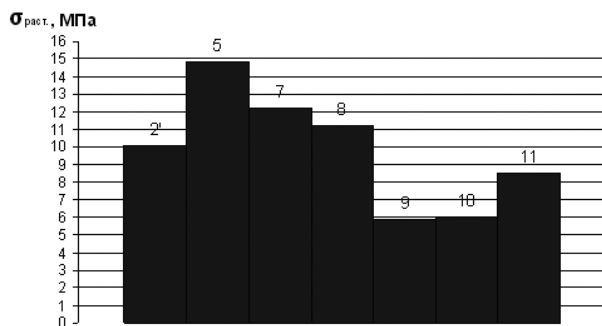


Рис. 5. Диаграмма распределения предела прочности горных пород при одноосном сжатии. 2' - 11 — типы горных пород (см. табл.)

При испытании образцов в начале нагружения находится область упругих деформаций, описываемая законом Гука.

Наклон прямолинейного участка диаграммы характеризуется модулем Юнга E . После достижения предела упругости в образце накапливаются необратимые деформации. После перехода через предел прочности наступает область запредельного деформирования, которая продолжается до достижения предела остаточной прочности. Запредельная ветвь диа-

граммы имеет прямолинейный характер, наклон прямой характеризуется модулем спада. Почти все породы имеют крутой участок диаграммы за пределом прочности. Полная диаграмма, а также запредельная ветвь, позволяет оценить степень хрупкости пород.

Коэффициент хрупкости пород определяется из выражения [4].

$$K_{\phi} = \frac{M}{M + E}, \quad (10)$$

где M - модуль спада; E - модуль упругости.

Коэффициент хрупкости изменяется в зависимости от свойств материала в пределах от нуля до единицы ($\Pi_3 \geq 0$). Чем ближе значение коэффициента хрупкости к единице, тем выше хрупкость горных пород.

Выше проведенные экспериментальные исследования (см. рис. 4) показали, что испытательное оборудование не обеспечивало для этих образцов жесткий режим нагружения, т.е. не удалось установить вели-

чины K_1 и K_2 , определенные из выражения [5-7].

$$K_1 = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_u} \quad \text{и} \quad K_2 = \frac{E}{M}, \quad (11)$$

где ε_y - упругая энергия; ε_u - полная энергия.

В связи с этим проведены дополнительные эксперименты на образцах из горных пород при скорости нагружения 0,1 мм/мин. Однако при скорости нагружения 0,1 мм/мин испытательное оборудование не позво-

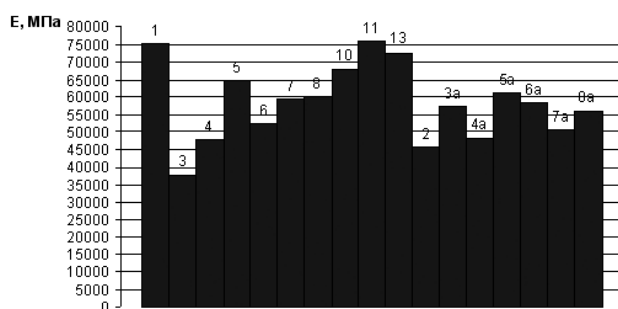


Рис. 6. Диаграмма распределения модуля Юнга (E) горных пород. 1-13 — типы горных пород (см. табл.)

лило получить энергоемкость запределного деформирования. Оценка опасности горных пород по хрупкому разрушению осуществляется с помощью прибора УМПП-3 по методике Л. А. Шрейнера путем вдавливания индикатора в породу с одновременной записью диаграммы разрушения самописцем в осях «нагрузка-деформация» [5, 6].

Модуль упругости (модуль Юнга, E) горных пород определялся по линейной части начальной нагрузочной ветви диаграммы деформирования (рис. 4, ф.1, 2). Установлено, что модуль упругости (E) колебался от 35500 до 75100 МПа (рис. 6). Для группы горных пород, включающей песчаник, перидотит, сульфидную руду, габбро-диабаз E составил соответственно 45100; 52500-72500 ($E_{cp}=62500$ МПа); 45500-65000 ($E_{cp}=55250$ МПа); 60000-75000 ($E_{cp}=68875$ МПа) МПа.

Коэффициент Пуассона (ν) определялся как отношение поперечной деформации к продольной деформации образца [1-3]. Установлено, что коэффициент Пуассона для габбро-диабазы составил 0,2; для перидотита - 0,22.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально установлены закономерности упруго-пластического деформирования габбро-диабазов, пилит песчаника, брекчированного перидотита, массивной руды, густовкрапленного перидотита, густовкрапленной сульфидной руды, перидотита с мелкой вкрапленностью сульфида и перидотита, в допределной и запределной областях нагружения при одноосном сжатии и скоростях нагружения 0,1 и 1 мм/мин. Построены диаграммы деформирования и «осевое напряжение – осевая деформация».

2. Проанализированы зависимости основных физико-механических характеристик горных пород Ждановского месторождения (предел прочности, предельная осевая и поперечная деформации, модуль упругости, коэффициент Пуассона и модуль спада) от коэффициента формы h/d и скорости нагружения V .

3. Установлено, что при скоростях нагружения образцов 0,1 и 1 мм/мин, все породы имеют крутой участок диаграммы за пределом прочности. Однако испытательное оборудование не позволило получить энергоемкость запределного деформирования.

4. По результатам экспериментальных исследований определены пределы прочности горных пород на одноосное сжатие [$\sigma_{сж}$]. Установлено, что [$\sigma_{сж}$] горных пород изменяется от 25,5 до 182,6 МПа. [$\sigma_{сж}$] перидотита, сульфидной руды, песчаника и густовкрапленной сульфидной руды колеблется соответственно: 92; 64,4; 97,1 МПа [$\sigma_{сж}$] средний для горных пород составлял 96 МПа. Предел прочности горных пород на растяжение [$\sigma_{раст.}$] колебался от 5,9 до 14,9

МПа, среднее значение $[\sigma_{\text{раст}}]$ составляло 9,8 МПа.

5. Установлено, что модуль упругости (E) горных пород колеблется от 35500 до 75100 МПа. В среднем $[E_{\text{ред}}]$ для различных пород составлял:

для песчаника – $4,5 \cdot 10^4$, перидотита – $6,2 \cdot 10^4$, сульфидной руды – $55,25 \cdot 10^4$; габбро-диабазы – $68,8 \cdot 10^4$ МПа. Определен коэффициент Пуассона (ν) для габбро-диабазы, равный 0,2 и перидотита – 0,22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии», Москва, 1985.

2. *Бурштейн Л.С.* Статические и динамические испытания горных пород, Л.: Недра, 1970.

3. *Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф.* Свойства горных пород и методы их определения, М.: Недра, 1969.

4. *Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г.* «Экспериментальная физика и механика горных пород», С-Пб.: Наука, 2001.

5. *Шрейнер Л.А., Павлова Н.Н., Байдюк Б.В. и др.* Методическое пособие по

использованию результатов испытаний механических свойств горных пород вдавливанием штампа. М.: Недра, 1967. — 39 с.

6. *Шрейнер Л.А., Байдюк Б.В., Павлова Н.Н. и др.* Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Недра, 1968. — 357 с.

7. *Курленя М.В., Еременко А.А., Шрепп Б.В.* Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2001. — 184 с. **ИДБ**

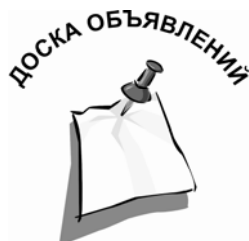
Коротко об авторах

Еременко Виталий Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИГД СО РАН, yge@ngs.ru

Жигалкин Владимир Михайлович – доктор физико-математических наук, зам. директора ИГД СО РАН, yge@ngs.ru

Потапов Евгений Владимирович – генеральный директор ОАО «Кольская ГМК»;

Атанов Василий Васильевич – начальник маркшейдерского отдела горно-геологического управления ОАО «Кольская ГМК».



• Издательство приглашает на работу руководителя рекламной службы, в обязанности которого будет входить привлечение рекламы в специальные горные издания и в научно-технический журнал «Горный информационно-аналитический бюллетень». Требования к кандидату:

- высшее техническое образование;
- возраст от 30 лет;
- опыт ведения переговоров.