

УДК 622.271

Г.М. Еремин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ РУДНОЙ (ПОРОДНОЙ)
МАССЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРОВ
СЕВЕРА**

Обосновано, что в некоторых случаях независимо от климатических условий на карьерах Севера можно добиться резкого повышения эффективности горных работ и процессов: будь то перепуск руд по глубоким карьерным рудоспускам или складирование пород со снегом на крутых горных склонах. Обоснован учет изменения физико-механических свойств пород при отвалообразовании. Предложено выделение стадий состояния и деформирования отвалов и определение их скоростей деформаций по эмпирическим формулам. Предложены новые технологические решения в зависимости от влияющих факторов. Приведены научно-методические положения по обоснованию применения на карьере с большим коэффициентом вскрыши и строительстве высоких отвалов циклично-поточной технологии.

Ключевые слова: условия Севера, свойства рудной массы.

На большинстве территорий, входящих в зону Заполярья, и представленных горнопромышленными районами, преобладающее влияние на эксплуатацию карьеров оказывают несколько факторов «сурового» климата: низкие отрицательные температуры, большое количество выпадающих твердых и жидких осадков, сложная орография районов, наличие на территориях леса или отсутствие его (зона тундр), гидрогеологический и мерзлотный режим пород массивов и др.

Как показал опыт работы горно-рудных предприятий в условиях Севера, в том числе Кольского полуострова, суровые климатические условия этих районов в значительной степени приводят к повышению затрат на добычу полезного ископаемого. Это является следствием того, что усложняется выполнение технологических процессов в карьерах из-за заноса рабочих площадок и дорог

снегом, влияния скорости ветра свыше 20–25 м/с и снежных зарядов, снижается производительность транспортной и горно-добычной техники (рудник Центральный ОАО «Апатит»). Из-за влияния отрицательных температур и повышения хрупкости стали или «хладноломкости» металла при температурах ниже минус 40–45 °С снижается работоспособность узлов и механизмов машин, повышается трудоемкость прокладки кабеля и труб в траншеях.

При этом необходимо подчеркнуть, что на работе карьеров, в первую очередь, сказываются не столько абсолютные значения указанных факторов, сколько комплексное их влияние, а также их резкое изменение во времени, с преобладающим влиянием того одного, то группы факторов, что усложняет регулирование параметров технологического процесса, и сказывается на изменении свойств горной массы (руды, породы).

Влияние указанных факторов также проявляется в резком изменении свойств рудной (породной) массы. При этом, в первую очередь, следует учитывать, что эти изменения внешних факторов вызывают изменения свойства рудной (породной) массы в процессе ее добычи и транспортировки до конечных пунктов потребления или перегрузки, (возможность ее смерзания или таяния снега в ней, изменения уплотнения под действием нагрузок, деформации слоев, сыпучести материала и др.), которые в настоящее время недостаточно изучаются и учитываются при проектировании технологических операций. Так, например, при введении глубоких рудоспусков в эксплуатацию на руднике Центральный ОАО «Апатит» недостаточно были исследованы процессы, связанные с перепуском руды по карьерным рудоспускам, в частности, уплотнения и смерзания. Рудная масса со снегом может уплотняться и смерзаться, а применение взрывчатых веществ (ВВ) для разрыхления материала приводит к разрушению устьевой и выпускной части рудоспусков (люков) и стенок их бункеров [1, 2]. И, наоборот, в весенний период при таянии снега и попадании талых вод в рудную массу при перерывах в ее выпуске, она может разжижаться и вырываться из аккумулирующего устройства рудоспусков по типу селевого потока, разрушая люковые устройства [1]. Такие случаи неоднократно имели место на первых этапах эксплуатации глубоких карьерных рудоспусков на руднике Центральный ОАО «Апатит».

В результате проведенных в Горном институте КНЦ РАН экспериментов в лабораторных и полупромышленных условиях были определены показатели физико-механических свойств породной массы со снегом и

влажгой (значения сцепления и угла внутреннего трения породы (руды) при влиянии заснеженности, отрицательной температуры). Изучено влияние статических и динамических нагрузок на повышение сцепления и смерзание материала и его деформации под действием касательных напряжений [3, 4].

На основе изучения и обобщения, полученных данных лабораторных экспериментов и практики работ на отвалах получена многофакторная зависимость величины сопротивления сдвигу (τ) и деформации (ℓ) материала от основных влияющих факторов в виде [4]:

$$\tau = A \cdot \sigma^a \cdot W_{c(e)}^e \cdot d^c \cdot v^d \cdot t^e, \text{ МПа} \quad (1)$$

$$\ell = A_1 \cdot \tau^{a_1} \cdot v_y^{a_2} \cdot W_{c(\%) }^{e_1} \cdot d_1^{e_1} \cdot T^{k_1}, \text{ мм/мин} \quad (2)$$

где A , A_1 – постоянные: σ , τ – соответственно нормальное и касательное напряжения, МПа; $W_{c(b)}$ – заснеженность (влажность) образца, %; d – средний диаметр частиц, мм; t – отрицательная температура, град; v_y – скорость усадки материала, мм/мин; T – время, мин.; a , b , c , d , e и a_1 , a_2 , b_1 , e_1 , k_1 – соответственно показатели степени при определении величины сопротивления сдвигу (τ) и деформации материала (ℓ).

Значения величин постоянных и показателей степени для образцов со снегом может составить:

$$A = 0,834 \div 1,0; a = 1,12 \div 1,15;$$

$$b = 0,06 \div 0,11; c = 0,04 \div 0,06;$$

$$d = 0,015 \div 0,021; e = 0,0015 \div 0,013.$$

Надежность и достоверность полученных зависимостей может быть оценена с помощью следующих коэффициентов: линейной аппроксимации $\xi=18-19$; коэффициент множественной достоверности $\mu_R = 43,5$; коэффициент по Фишеру $F = 2,4$ [5].

При определении величины деформации ℓ значения постоянной и показатели степени составляют: $A_1 = 3,82$; $a_1 = 1,05$; $a_2 = 0,157$; $b_1 = 0,08$; $c_1 = 0,104$; $K = 0,87$ коэффициенты надежности и достоверности ($\xi = 10,71$; $\mu_R = 238,6$; $F = 4,17$).

Данные определения величины сопротивления сдвигу (τ) и деформации (ℓ) показывают, что с увеличением нормальной и сдвигающей нагрузок их значения возрастают, при чем с увеличением заснеженности и смерзания породной массы в поле отрицательных температур сопротивления сдвигу может увеличиться в 5–10 раз, а деформации породного материала снизятся почти во столько же раз (из-за упрочнения смерзшейся массы).

Наоборот, при таянии снега в породной массе или при попадании в нее воды сопротивление сдвигу снижается. На графике рис. 1 а, б приведены зависимости, иллюстрирующие изменение величины сопротивления сдвигу и сцепления (c) с увеличением влажности породного материала до его насыщения, причем их минимальные значения достигаются быстрее для мелкофракционного материала (типа концентрата) (рис. 1 а, кривая 1) и большей для крупнокускового материала (кривая 2). На рис. 1 б показаны случаи, когда в зависимости от содержания снега в породной массе (кривая 1 при малом содержании снега в породе – отвал № 7 и кривая 2 с большим содержанием снега в породе (15–20 % для фракции 0–5 мм), и протекающих процессах смерзания породы в той или иной степени в весенне-летний периоды отвалообразования прекращается отсыпка породы в отвал (позиция 3, отвал в стадии деформации). При плюсовых температурах воздуха, а также попадании талых вод в отвал, снег в нем тает, породная масса насыщается

водой. Сцепление такого материала снижается до нулевых значений (рис. 1 б, кривая 4), и отвал переходит в стадию катастрофической деформации и обрушается со склона типа селевого потока. Более подробно возможные гипотезы обрушения отвалов со склонов приведены в работах проф. Ц.Х. Абеяна и А.М. Гальперина (южные отвалы) и работах сотрудников Горного института КНЦ РАН [3, 4].

Влагонасыщение породы протекает во времени, и стекающая вода по порам и склону скапливается в передней части отвала перед призмой упора и образует водный столб, который при достижении предельных параметров разрушает преграду (оставшуюся смерзшую породу) и срывается со склона типа селея [4].

В соответствии со снижением прочностного состояния пород отвала (сцепления c и угла внутреннего трения ϕ) происходит нарастание скорости его деформации (рис. 1 в, г). На этих графиках приведены зависимости изменения скоростей деформации отвалов № 4, № 4а, № 6, № 8, № 9 на склонах рудника Центральный ОАО «Апатит», причем первые три из них (№ 4, № 4а, № 6 – обрушившиеся со склона типа меля) отвалы южной экспозиции, а № 8, № 9 – временные отвалы (северо-восточной экспозиции). Они сместились со склона плавно с небольшим увеличением скорости в стадии деформации (до 800–900 мм/сут.), после чего их скорость деформаций составила 200–300 мм/сут.

Изучение процессов отсыпки пород в отвалы и анализ скоростей деформации отвалов позволило выявить три стадии их состояния и деформирования во времени: периода устойчивого отвалообразования – стадия I с небольшими скоростями деформа-

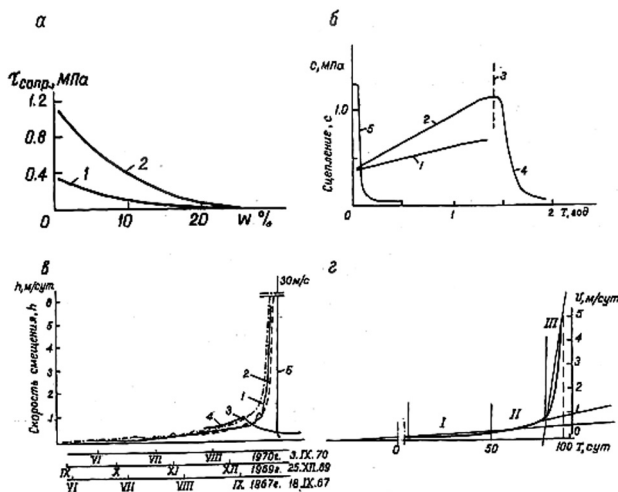


Рис. 1. Графики изменения сопротивления сдвигу (τ) и сцепления (c) руды (породы) со снегом во времени при насыщении ее водой (рудоспуск) или таянии снега (отвал) (а, б) и скоростей деформаций отвалов (обрушение со склонов) и скоростей транспортирования пород (временные отвалы) (в, г):

а – 1, 2 – соответственно изменение сопротивления сдвигу мелко- и крупнофракционного материала в зависимости от его сложности, $W, \%$; б – 1 – при малой заснеженности породы (отвал 7), 2 – смерзание породы со снегом (отвалы № 5, № 6), 3 – период прекращения отсыпки пород, 4 – снижение сцепления в породе при таянии снега, 5 – при насыщении руды водой в бункере рудоспуска; в – 1, 2, 3 – деформирование отвалов 4, 6, 4а при их обрушении, 4 – деформирование временных отвалов 8, 9, 10 (самотечное транспортирование пород), 5 – характер деформации при обрушении отвалов; г – обобщенная зависимость скорости смещения с выделенными стадиями деформации отвала; I, II, III – соответственно стадии устойчивого состояния (I), попадания влаги в подстилающие слои призмы давления и упора (II) и таяния снега и насыщения пород водой (техногенный сель) (III)

ции (от 50 до 150–300 мм/сут.), период с увеличением скорости деформаций до 500–600 мм/сут. – стадия II и период с увеличением скорости деформаций до 5–10 м/сут. – стадия III (с зарождением и развитием очага техногенного селя).

Все эти стадии состояния отвала и его деформации приведены на обоб-

щенной кривой деформации отвала (рис. 1 г). Использование такой обобщенной зависимости важно в прогностических целях при планировании и отсыпке пород требуемой интенсивности и производительности.

Для учета изменения сцепления в реальных условиях могут быть привлечены данные практики [3, 4]. Снижение сопротивления сдвигу τ и сцепления c частиц при таянии снега в породе (руде) и деформации породной (рудной) массы при насыщении водой представлены на рис. 1 а, б, в, г.

На обобщенной зависимости выделяются стадии состояния отвала: устойчивую I стадию (зимний, летний периоды), второй II стадии с попаданием влаги в подстилающие слои призмы давления и упора и третьей III стадии с таянием снега в породе (летний-осенний периоды) и с зарождением техногенного селя (рис. 1 в, г). Скорости деформации отвала на всех стадиях могут быть определены по эмпирическим формулам вида

$$v_{1,2,3} = A_{1,2,3} + B \cdot T, \text{ мм/сут.} \quad (4)$$

где A – постоянные; $A_1 = 230$ мм/сут.; $A_2 = 445$ мм/сут.; $A_3 = 750$ мм/сут.; B_{I-III} – тангенс угла наклона касательных к кривой скорости деформации отвала, T – время, сут.; $B_I = 4,3$ мм/сут.; $B_{II} = 10,1$ мм/сут.; $B_{III} = 180 - 200$ мм/сут. или по формуле вида (степенная зависимость):

$$v = A_0 + C \cdot T + D \cdot T^2, \text{ мм/сут.} \quad (5)$$

где A_0 – постоянные; $A = 230$; C, D – постоянные $D_{I,II} = 0,07$; $D_{III} = 0,7$; T – продолжительность контролируемого периода, сутки.

Подсчеты по эмпирическим формулам вида (4) дают величины скорости $v_I = 440\text{--}450$ мм/сут.; $v_{II} = 750$ мм/сут.; $v_{III} = 8000$ мм/сут.

По степенной зависимости вида (5) величины скорости к концу первого этапа (стадии) составляет 435 мм/сут. ($T = 50$ сут.), второго – 770 мм/сут. ($T = 85$ сут.), третьего – 8000 мм/сут. ($T = 105$ сут.), что достаточно близко к наблюдаемым на практике 5,5–10 м/сут. перед обрушением отвалов со склонов.

Выделение стадий состояния отвала позволяет регулировать процесс отвалообразования при переходе от одного сезона в другой, применением, например, буфера из пород без снега для защиты откоса и площадки с породой со снегом для исключения его таяния, и тем самым можно продлить период устойчивого отвалообразования (стадия I). Также при применении предлагаемых технических решений может быть продлена II-ая стадия деформирования отвала, а III-я стадия вообще исключена (пригрузе-ние тела отвала при боковой его подсыпке и применение консоли при отсыпке пород) [4, 8].

Применение усредненной степенной зависимости ограничено, она не учитывает специфики и особенностей отсыпки отвалов, и при этом предполагается осуществление одного сценария развития процессов в отвале: переход от стадии устойчивого отвалообразования до обрушения отвала со склона. Тем не менее, полученные расчетные данные позволяют осуществлять прогноз деформации отвала за 2–3 месяца и разработать необходимые технологические мероприятия, предупреждающие обрушение отвала со склона и, таким образом, управ-

лять процессом деформирования (смещения) отвала на склоне (временные отвалы).

Совершенствование технологических процессов (перепуск руды со снегом по рудоспускам, отвалообразование на склонах) позволило не только оптимизировать параметры технологических процессов управлением физическим состоянием породного (рудного) тела для исключения его смерзания в рудоспусках, но и разработать и использовать на практике методологию закономерного самотечного транспортирования пород отвалов по склонам (временные отвалы) на руднике Центральный ОАО «Апатит», что явилось первым опытом в мировой практике управляемого смещения более четырех десятков миллионов кубов вскрыши за границы карьера [2, 3, 4]. Важно для учета на практике предложение по исключению образования техногенных селей, при складировании пород на склонах, число которых по данным маркшейдерской службы рудника Центральный только за 20-летний период эксплуатации отвалов составило 23, около 10 случаев плавного смещения их со склонов, и есть опасность их образования в будущем [3]. Предложен способ отсыпки пород на косогорах, позволяющий исключить развитие очага техногенного селя в теле отвала при боковой засыпке деформирующегося отвала. При этом создается экран из породной массы без снега, что предотвращает таяние снега в породе зимнего периода и даже способствует ее смерзанию (патент РФ) [5]. Для исключения проявления негативных последствий при формировании отвалов на карьерах целесообразно внести изменения в некоторые пункты ЕПБ, касающиеся отвалообразования на склонах, а также в технологические инструкции, поло-

жения которых не отвечают требованиям современной практики и в значительной мере устарели.

Аналогичные процессы, связанные с изменением свойств рудной массы под действием ряда факторов от смерзания рудной массы со снегом и до его таяния при попадании талых вод имели место и в рудоспусках [1, 2]. При этом сцепление в руде снижалось на 2–3 порядка (кривая 5 на рис. 1), что неоднократно приводило к выбросу разжиженной рудной массы в штольню.

Изучение перепуска рудного материала со снегом в рудоспусках на моделях позволило выявить зоны уплотнения и ядро смерзания руды в бункере, а также образование активных и пассивных зон в бункере при динамических воздействиях от падающих с большой высоты кусков руды. При соосном выполнении ствола и бункера рудоспусков вероятность появления состояния со смерзанием руды и величиной сцепления, приближающейся к критическим значениям, составляет 40–50 % и более [2]. Это повышает возможность образования завесаний руды в рудоспусках. На моделях с относительным смещением оси ствола и бункера рудоспусков удалось установить, что интенсивность потока руды при смещении ее в боковые, более разрыхленные зоны увеличивается, а ширина потока руды повышается в 1,5–2 раза (рис. 2). На способ транспортирования руды по

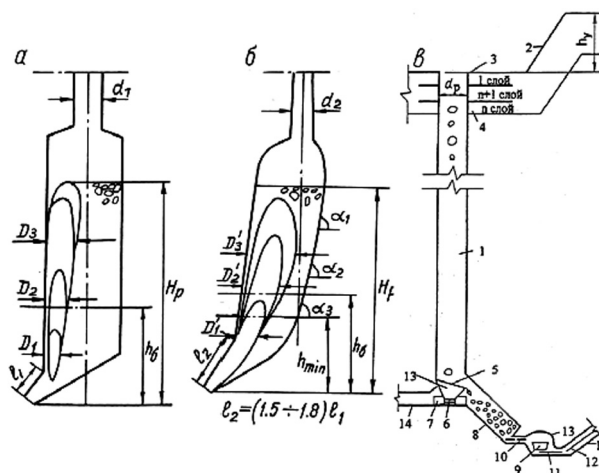


Рис. 2. Схема конструктивного устройства бункерной части рудоспусков, используемых в проектах (а) предлагаемого (б): а, б – d_1 , d_2 – диаметры рудоспусков $d_2 < d_1$; D_1 , D_2 , D_3 и D'_1 , D'_2 , D'_3 – соответственно ширина потока рудной массы при вертикальном заложении бункера и относительно наклонным: H_p – высота руды в бункере; l_1 , l_2 – соответственно длина выпускной части в традиционном исполнении и предлагаемом; α_1 , α_2 , α_3 – углы наклона участков стенки бункера; h_6 – высота слоя руды в бункере («подушка») и ее минимальная величина h_{min} ; в – рудоспуск с дробильным звеном по патенту РФ № 2249697; 1 – ствол рудоспуска; 2 – откос уступа; 3 – участок срезки рудоспуска; 4 – слой срезки; 5 – дробильное звено; 6 – плита; 7 – основание дробильного звена; 8 – бункер дробленой руды (породы); 9, 10 – соответственно дробилка и питатель; 11 – выдачной питатель; 12, 13 – соответственно наклонный конвейер и камера дробилки; 14 – вспомогательная выработка; 15 – наклонная выработка

глубоким (до 600 м) рудоспускам с учетом эффекта додрабливания руды и выпуском ее с небольшим уплотнением получен патент РФ [7].

Установление особенностей и закономерностей перепуска руд со снегом по глубоким рудоспускам, решение технологических вопросов по обоснованию рационального режима загрузки и выпуска руды, а также конструктивных элементов выпускной части бункеров рудоспусков позволяет

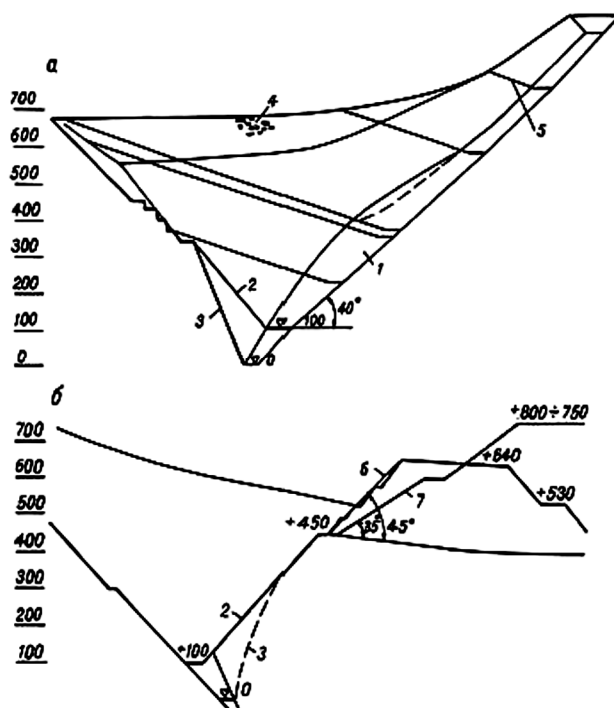


Рис. 3 а, б. Схема разработки рудного тела «Восточный Расвумчорр» открытым способом:

а – 1 – рудное тело; 2, 3 – соответственно положение участка борта при отметке дна карьера +100 м и 0 м; 4 – сместившиеся породы временных отвалов; 5 – положение рабочего борта при понижении горных работ; б – 1, 2 – соответственно откос борта по предложению и предпроектным проработкам; 6, 7 – соответственно откос отвала по проекту и предлагаемый высокий отвал и его откос

по-новому подойти к решению вопросов транспорта руды при разработке ряда месторождений. Так, могут быть на новой основе решены проблемные вопросы транспорта руды до перегрузочного пункта при разработке апатитового месторождения «Олений Ручей», месторождения «Восточный Расвумчорр» рудником Центральный с применением рудоспусков и конвейерного транспорта. Такой вариант может быть альтернативным варианту с применением только автомобильного транспорта для доставки руды по

косоугру до перегрузочного пункта с плечом перевозки до 16 км или 4,5 км до фабрики по новой проработке института Гипроруда, а также при доставке руды на Центральном руднике до рудоспуска № 6 или до перегрузочной площадки Коашвинского карьера.

Исследования, проведенные в Горном институте КНЦ РАН, позволили разработать ряд технологических схем и способов транспортирования руды по рудоспускам и вскрышных пород при складировании их в отвалы с исключением негативных последствий, связанных со смерзанием руды в рудоспусках (зависания руды) и обрушением отвалов типа селей [2, 4, 5, 6]. Учитывая резко возрастающие затраты на транспортирование пород вскрыши с глубиной Коашвинского и Ньюоркпахкского карьеров Восточного рудника ОАО «Апатит», выполнена оптимизация мест размеще-

ния отвалов и транспорта руды и вскрыши до мест складирования или перегрузки. Технологические схемы и параметры отвалов предложены для использования на практике. Обоснована целесообразность применения циклично-поточной технологии (ЦПТ) при организации и строительстве высоких отвалов (высота $H = 200-300$ м), размещаемых вблизи Коашвинского карьера, а также Центрального рудника, емкость отвала $V_o = 300-350$ млн. m^3 (рис. 3) [8].

Заключение

Установление основных особенностей и закономерностей изменения свойств горной массы в широких пределах: от процесса смерзания в навале (отвал, склад) до жидко-текучего состояния в рудоспусках и отвалах позволило разработать новые технологии, повышающие стабильность и эффективность технологических процессов на карьерах в условиях Севера.

Определение и учет прочностных и деформационных свойств руд и пород со снегом (льдом) в различных горно-технологических процессах на карьерах независимо от влияния климатических факторов,

обеспечивает достижение крупных положительных эффектов, если правильно и своевременно определены эти свойства, параметры процессов, установлено их соответствие изменяющимся условиям и на долговременной основе. Такой подход предполагает использование научных методов организации и ведения горных работ на карьерах.

Наглядным примером такого сотрудничества является успешная высокоэффективная эксплуатация нагорного карьера рудника Центральный ОАО «Апатит» и других карьеров Мурманской области (карьера ОАО «Ковдорский ГОК», Оленегорского ОАО «ОЛКОН»). **ГИДБ**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржевский В.В., Арсентьев А.И., Пермяков Р.С. и др. Карьерные рудоспуски. – М.: Недра, 1969. – 208 с.
2. Гушин В.В., Епимахов Ю.А., Козырев А.А. и др. Глубокие рудоспуски. – Изд-во Кольского научного центра. – Апатиты, 1997. – 196 с.
3. Красносельский Э.Б., Калабин Г.В., Оводенко Б.К. и др. Отвалы на горных склонах. – Л.: Наука, 1975. – 152 с.
4. Еремин Г.М. Физико-технические и геомеханические процессы в насыпных породах на склонах. – М.: Изд. «Горная книга», 2007. – 130 с.
5. Уилке С. Математическая статистика. М.: Наука, 1967. – 632 с.
6. Еремин Г.М. Патент РФ № 2237166 Способ формирования отвалов на косогорах. 2003.
7. Еремин Г.М. Патент РФ № 2249697 Способ открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Опубл. 10.04.2005. Бюл. № 10.
8. Еремин Г.М. Патент РФ № 2310077 Способ формирования высокого ярусного отвала. Опубл. 10.11.2007. Бюл. № 31.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Еремин Георгий Михайлович. – кандидат технических наук, научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Горного института Кольского научного центра РАН, eremin@goi.kolasc.net.ru

