

УДК 622.281.4:666.9.017 (470.21)

Ю.Г. Смирнов, А.О. Орлов

Системный мониторинг бетонной крепи на горнопромышленных предприятиях Хибин

Yu.G. Smirnov, A.O. Orlov

System monitoring of concrete lining for the mining companies of Khibiny

Аннотация. В статье представлены результаты исследований прочностных характеристик монолитной бетонной и набрызгбетонной крепей неразрушающим методом, которые отражают эксплуатационное состояние выработок. Приведены сравнительная оценка прочности бетона в натуральных и лабораторных условиях и геометрические параметры набрызгбетонной крепи.

Abstract. The paper presents the research results on strength characteristics of monolith concrete and shotcrete supports with a non-destructive method, these characteristics reflect the operational state of the mine workings. The comparative assessment of the concrete strength under in-situ and laboratory conditions has been given. The geometrical parameters of the shotcrete support have been presented.

Ключевые слова: рудник, вертикальный ствол, горная выработка, крепление, монолитная бетонная крепь, набрызгбетон, мониторинг, прочность, неразрушающий контроль

Key words: mine, vertical shaft, mine working, support, monolith concrete support, shotcrete support, monitoring, strength, non-destructive control

1. Введение

Хибинские месторождения апатит-нефелиновых руд обрабатывают горнодобывающие предприятия АО "Апатит" и СЗФК "Олений ручей" (работающий карьер и строящийся подземный рудник). Инженерно-геологические условия рассматриваемых месторождений характеризуются склонностью к проявлению горного давления в динамических формах вплоть до горных ударов. Характерные особенности Хибинского горного массива – отсутствие смещений на контуре горных выработок и действие сложного поля напряжений, обусловленного гравитационными и тектоническими силами. На контуре выработки концентрация сжимающих напряжений в 2-3 раза выше, чем в нетронutom массиве. В настоящее время совершенствуется технология крепления при строительстве горных выработок на данных предприятиях, повышается эффективность работы и производительность труда, в том числе и за счет внедрения новых конструкций крепи и средств механизации процесса крепления (Смирнов, Орлов, 2014).

С начала 2000-х гг. на подземных рудниках АО "Апатит" широко применяются облегченные виды крепи, удельный вес которых в настоящее время составляет более 95 %. К ним относятся железобетонные штанги, набрызгбетон и комбинированная крепь (железобетонные штанги с набрызгбетоном). Основным видом крепления горных выработок является набрызгбетон, преимущества которого явились одной из весомых предпосылок для расширения области его применения (Запорожец и др., 2004).

Ведение горных работ в ухудшающихся горно-геологических условиях требует обеспечения их безопасности, в связи с чем вопросы поддержания горных выработок и контроль за их состоянием в течение всего срока эксплуатации приобретают все большую актуальность. Организация мониторинга крепи горных выработок является одной из первоочередных практических задач.

Основным нормативным документом, регламентирующим контроль прочности бетона, является ГОСТ 18105-86. В соответствии с ним при изготовлении монолитных конструкций статистический контроль прочности бетона должен вестись дважды: на заводе-изготовителе товарного бетона и на строительной площадке. Стандарт достаточно подробно регламентирует правила контроля прочности бетона. Требуемая (средняя) прочность бетона регулируется в зависимости от значения коэффициента вариации.

В настоящее время в строительной индустрии, тоннелестроении и на горнодобывающих предприятиях приняты разрушающие способы контроля прочности бетона, к которым относится метод стандартных образцов. Пробы отбирают из одной партии непосредственно на рабочем месте. Образцы, изготовленные из бетонной смеси, испытывают через 28 суток. Прочность бетона в конструкциях может отличаться от прочности контрольных образцов-кубов. Таким образом, при осуществлении контроля

прочности по действующим нормативным документам фактическая прочность бетона в конструкциях, как правило, отличается от проектных показателей. Все это определяет необходимость применения других методов контроля прочности.

В последние годы в отечественной и зарубежной практике большое внимание уделяется применению неразрушающих методов контроля качества бетона. Неразрушающий контроль (НК) осуществляется в соответствии с ГОСТ 22690-88 "Бетоны. Определение прочности бетона методами неразрушающего контроля". Однако современная приборная база НК существенно отличается от рекомендуемой авторами стандартов. С начала 1990-х гг. активно ведется разработка и производство приборов НК нового поколения с применением электроники и микропроцессорной техники, улучшаются их функциональные возможности. Методики контроля, рассматриваемые в ГОСТах, не претерпели существенных изменений и остаются основой развития средств НК в строительной отрасли.

Динамика развития НК обусловлена расширением сферы его применения и постоянно растущими потребностями, а также совершенствованием различных конструкций приборов. Преимущества данного метода обусловлены его высокой производительностью и достоверностью результатов.

При оценке качества бетонных конструкций в процессе строительства наземного особо ответственного сооружения на Арктическом Севере России авторами апробирован неразрушающий контроль прочности бетона с использованием электронных склерометров *Digi Schmidt 2000* и *Silver Schmidt* (Швейцария). Диапазон измерений приборов составляет 10-70 МПа. Действие их основано на принципе упругого отскока (*Digi Schmidt 2000*) и ударного импульса (*Silver Schmidt*). Неразрушающий контроль прочности бетона склерометрами Шмидта и его аналогами включен в нормативные документы многих стран (EN 12504/2; ENV 296; ASTM C 805; BS 1881; DIN 1048) и осуществляется в соответствии с действующими государственными стандартами (*Конухин и др., 2009*).

Метод неразрушающего контроля был реализован применительно к подземным условиям, так как при креплении горных выработок необходимы обязательный контроль состояния бетонных конструкций и всесторонний анализ факторов, влияющих на их эксплуатационные характеристики. Определяющим фактором состояния конструкций принято считать соответствие фактической прочности бетона проектным требованиям.

2. Система мониторинга на подземных рудниках АО "Апатит"

Для создания системы мониторинга крепи на рудниках были выбраны участки измерений на вертикальной и горизонтальных выработках в зоне влияния очистных работ. На опытных участках заложены площадки для долговременного наблюдения за состоянием горной выработки и крепи.

Исследования прочности бетона проводились в южном вентиляционном стволе № 2 при его углубке. Известно, что вертикальный шахтный ствол – наиболее ответственное инженерное сооружение, являющееся главной транспортной или вентиляционной выработкой на весь период существования горнодобывающего предприятия. В связи с длительным сроком службы шахтных стволов и ответственностью сооружения к ним предъявляются повышенные требования. Конструкция крепи должна обеспечивать устойчивость и долговечность всех элементов шахтного ствола, а также успешно работать в условиях негативных воздействий, включающих высокое горное и гидростатическое давление, влияние очистных работ и околоствольных выработок.

Вертикальная выработка и сопряжения крепятся монолитным бетоном толщиной 0,5 м (класс бетона В25). Твердение бетона – весьма сложный процесс, зависящий не только от состава бетона и качества его компонентов, но и целого ряда внешних факторов (например, температуры и влажности окружающего воздуха), а также способа и плотности укладки. Возведение крепи в стволе производится в стандартной инвентарной опалубке, крепление сопряжений с горизонтальными выработками – в деревянной опалубке. Подачу бетонной смеси за опалубку осуществляют по бетоноводу с поверхности под действием собственного веса (*Орлов, Смирнов, 2009*).

Натурные испытания по определению прочности бетона в строящемся вертикальном стволе производились после достижения бетоном нормативного времени твердения (28 суток). Предварительно были выполнены сравнительные испытания прочности бетона на сжатие с использованием лабораторного гидравлического пресса и электронного склерометра Шмидта.

Расположение и количество площадок измерений принималось в соответствии с методикой проведения исследований. Измерение проводилось на трех площадках в вертикальном стволе и на двух площадках сопряжения ствола с горизонтальной выработкой. Одна из стенок в стволе была увлажнена. Место расположения контролируемых площадок измерения представлено на рис. 1.

На каждой площадке производился замер прочности бетона по 6-10 участкам, расположенным по вертикали. Размеры измеряемой площадки по высоте составляли 1,5-2,0 м. Перед началом испытаний производилась зачистка измеряемой поверхности от пыли и остатков цементного раствора (где это было

необходимо). Следует отметить, что поверхность измерений была достаточно ровной, так как опалубочный бетон имеет незначительную шероховатость.

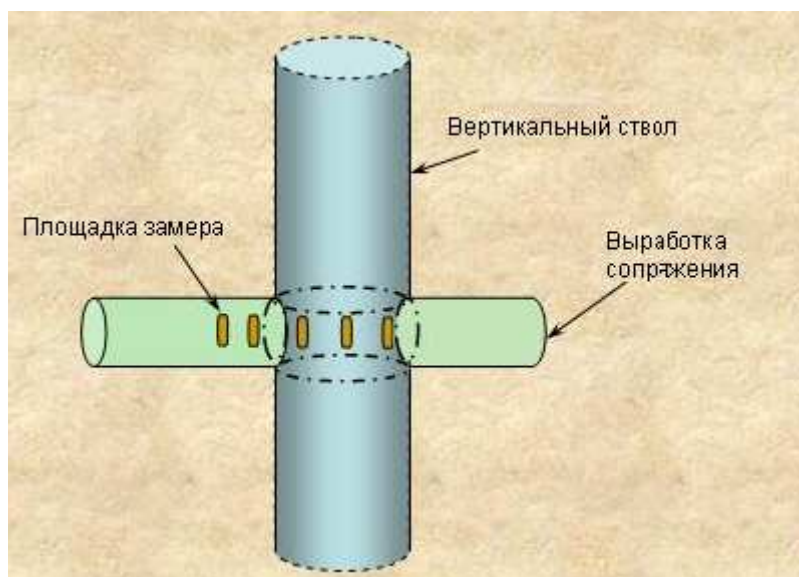


Рис. 1. Место расположения площадок измерения

Методика замера на каждом отдельном участке включает снятие 12 измерений. Расстояние между точками испытаний составляет не менее 30 мм. Средняя величина прочности по каждому участку измерений рассчитывалась как среднеарифметическое по 10 замерам, так как наибольшее и наименьшее значения автоматически отбрасывались. Колебания значений среднеквадратичного отклонения прочности бетона на отдельных участках составляли 1,3-3,5 МПа (при средней величине 2,2 МПа). Коэффициент вариаций находился в диапазоне 3-8 %.

В процессе производства натуральных измерений было установлено, что на всех площадках замера бетон набрал нормативную прочность. В местах интенсивного поступления воды по бетонной стенке измерения не проводились. Распределение значений прочности бетона по высоте в пределах вертикальной площадки измерения представлено на рис. 2.

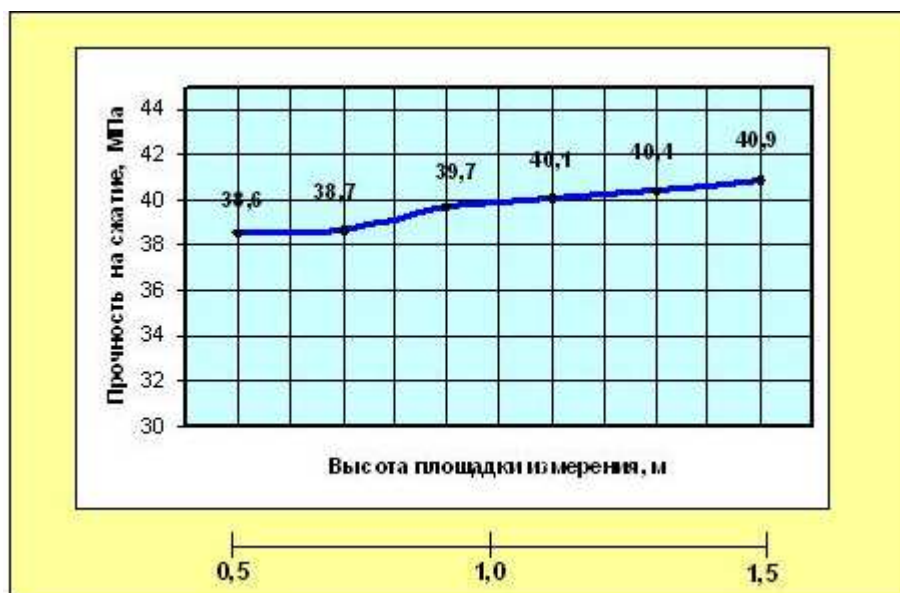


Рис. 2. Распределение значений прочности бетона по высоте в пределах вертикальной площадки ствола

Анализ прочности бетона по высоте выработки в диапазоне 0,5-1,5 м на некоторых площадках измерения показал увеличение прочности в верхних точках замеров относительно нижних. Разброс значений прочности по высоте составил около 6 %. Можно предположить, что данная закономерность

связана с перераспределением цементного молока в процессе подачи бетонной смеси за опалубочное пространство.

Определенный разброс значений прочности в пределах 5-12 % наблюдался на участках с разной степенью увлажнения поверхностного слоя бетона в стволе и выработке сопряжения. Необходимо отметить несколько замедленную динамику набора нормативной прочности бетона по времени в связи с особым температурно-влажностным режимом вертикального ствола.

Выполненные работы по определению прочностных характеристик бетона при углубке вертикального ствола южного вентиляционного ствола Объединенного Кировского рудника АО "Апатит" неразрушающим методом показали техническую возможность использования данного способа в подземных условиях. Комплекс проведенных исследований показал соответствие прочностных характеристик бетона в несущих конструкциях вертикального ствола проектным требованиям.

Система мониторинга крепи в горизонтальных выработках на Объединенном Кировском руднике включала определение прочностных характеристик и геометрических параметров набрызгбетонной крепи. Толщина набрызгбетонной крепи на участке наблюдений составляла 7-10 см. Состояние поверхности бетона после восьмилетнего времени твердения хорошее, трещин, шелушения и сколов визуально не обнаружено. Среднее значение прочности по четырем участкам в восьмилетнем возрасте составляет 43,3 МПа, что в 1,4 раза больше среднего значения прочности бетона марки М 300 в месячном возрасте.

Оценка поперечных смещений крепи в горной выработке осуществлялась с помощью лазерной рулетки. Замерялась ее ширина между двумя анкерными болтами. Ширина выработки определялась по пяти измерениям, среднее значение составляет 5,464 м; погрешность измерительного инструмента 1,5 мм. Дальнейшие измерения, проведенные в течение года, не показали изменения ширины выработки.

На другом участке наблюдений, где бетон имеет меньшие сроки твердения, были сформированы две площадки для измерений прочности бетона. Толщина крепи на данном участке находится в диапазоне от 4 до 9 см. Среднее значение ширины выработки в свету (по пяти измерениям) составляет 5,706 м; прочность набрызгбетонной крепи в возрасте 40 суток – 42-45 Мпа; среднее значение прочности набрызгбетона в возрасте одного года – 44,4 МПа.

Следующий участок измерений характеризовался тем, что площадки были сформированы методом фиксированного оттиска в процессе нанесения набрызгбетона на поверхность выработки.

Толщина крепи на данном участке составляет от 5 до 8 см; среднее значение ширины выработки в свету (по пяти измерениям) – 5,744 м. Изменения ширины выработки по результатам измерений в течение года не наблюдалось. Прочность набрызгбетона замерялась в возрасте 7, 30, 180 и 360 суток. Основной прирост значений в подземных условиях происходит в первые 30 суток и составляет 75-80 %; в дальнейшем увеличение прочности незначительное и составляет соответственно в возрасте 180 суток 7-10 %, 360 суток – 5-8 %.

Для определения прочности бетона в лабораторных условиях были изготовлены кубы размером 100×100×100 мм. Сравнительная характеристика прочности набрызгбетона в подземных и лабораторных условиях представлена в таблице.

Таблица. Значение прочности бетона в лабораторных и подземных условиях

Среднее значение	Прочность, МПа			
	7 суток	30 суток	180 суток	360 суток
Подземные условия	15,4	35,9	38,7	41,1
Лабораторные условия	17,6	43,2	54,3	56,0

На начальном этапе натурных исследований для мониторинга крепи на Расвумчоррском руднике в действующей выработке выбран один из экспериментальных участков, расположенный в зоне влияния очистных работ. На сопряжении буродоставочного штрека и заезда в рудоспуск сформирована наблюдательная станция, в которую входит десять площадок измерений прочностных и геометрических параметров. Подготовка площадок для измерений включала: выбор участков с относительно ровной поверхностью и полным отсутствием увлажнения, выравнивание и шлифовка поверхности измерений абразивным инструментом.

Оценка физико-механических характеристик крепи выполнялась на стенках выработки, закрепленной обычным набрызгбетоном и с использованием суперпластификатора *glenium* (гленiuма), При определении прочностных свойств набрызгбетона применялся неразрушающий метод контроля (Орлов, Смирнов, 2014).

Визуальный анализ поверхности набрызгбетона на стенках выработки показал, что бетон на участках с использованием суперпластификатора имеет более однородную и менее пористую структуру. В среднем было зафиксировано повышение прочности набрызгбетона на участке с пластификатором на 14 %. Кроме того, определялась толщина набрызгбетона по стенкам выработки на участке длиной около 5 м (девять точек). Для этого на стенке выработки сверлились отверстия диаметром 6 мм с шагом

0,5-1,0 м. Изменение толщины слоя набрызгбетона вдоль стенки выработки показано на рис. 3. В целом толщина набрызгбетона соответствует проектному показателю – 3 см. В двух точках толщина крепи составила 1,5 см, в остальных точках – 2,7-3,5 см.

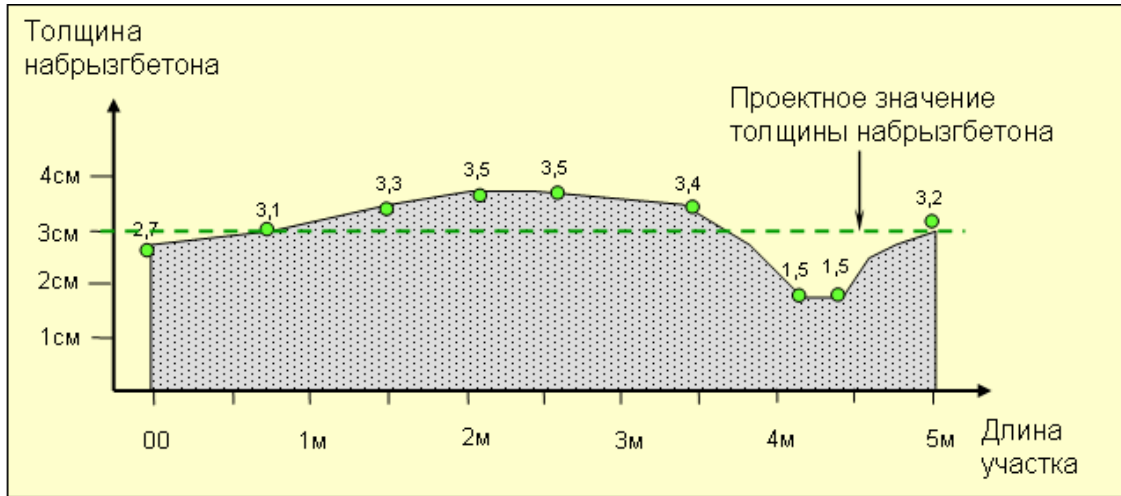


Рис. 3. Изменение толщины слоя набрызгбетона на стенке выработки

В ходе проведенных натурных исследований на Расвумчоррском руднике были получены следующие результаты:

- оценка прочностных характеристик материала крепи неразрушающим методом показала повышение прочности набрызгбетона на участке с применением суперпластификатора в среднем на 14,0 %;
- увлажнение от капежа стенок выработки, закрепленных набрызгбетоном, приводит к снижению прочности набрызгбетонной крепи в месячном возрасте на 10 %.

3. Определение прочности набрызгбетонной крепи на подземном руднике СЗФК "Олений ручей"

На месторождении Олений ручей в настоящее время осуществляется строительство подземного рудника, в связи с чем проходится и закрепляется большое количество горных выработок. В качестве основного вида крепи применяется набрызгбетонная крепь, сопряжения усиливаются тросовыми анкерами. Для их возведения используются автоматизированные средства механизации импортного производства. Общий вид транспортной штольни приведен на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид транспортной штольни

Как известно, устойчивое состояние выработок в условиях динамического проявления горного давления, что характерно для данного месторождения, обеспечивается проведением специальных профилактических мероприятий и выбором оптимального способа крепления. Дальнейший переход к разработке рудных тел на больших глубинах и отнесение месторождений к склонным и опасным по горным ударам обусловили необходимость решения принципиально новых задач по обеспечению устойчивости выработок. Основным фактором, определяющим выбор типа и вида крепи, являются фактические горно-геологические условия.

С учетом преобладающего значения для крепления выработок набрызгбетона в натуральных условиях были заложены наблюдательные станции для определения фактической прочности набрызгбетонной крепи, на которых через 28 суток (нормативное время твердения бетона) неразрушающим методом определялась прочность набрызгбетона и контролировалась толщина крепи. Площадки для производства замеров прочностных характеристик формировались на стенке выработки методами шлифовки алмазным диском или вдавливания на поверхности свежешуложенного набрызгбетона.

Контроль прочности набрызгбетонной крепи в горных выработках осуществлялся через 28 суток (нормативное время твердения бетона) неразрушающим способом с использованием электронного склерометра Шмидта. Прочность набрызгбетонной крепи, замеренной в подземных условиях, составляла соответственно 29-32 МПа (при среднем значении 30,5 МПа), что соответствует классу бетона по прочности В22.

На исследуемых участках определялась также толщина набрызгбетона по стенкам выработки. Для этого сверлились отверстия диаметром 6 мм с шагом 0,5-1,0 м. Толщина набрызгбетона соответствует проектному показателю – 5 см. Величина отклонения толщины набрызгбетона в сторону уменьшения в среднем составляет 5-7 %, что в целом не сказывается на несущей способности крепи.

4. Заключение

По мере увеличения глубины разработки вопросы поддержания горных выработок приобретают все большую актуальность. Снижение устойчивости выработок и, соответственно, возрастание затрат на их поддержание обусловлены высокими гравитационными и тектоническими напряжениями. Развитие разрушений во вмещающем массиве зависит не только от прочностных характеристик и трещиноватости пород, но и в большей степени от уровня напряжений вблизи контура и динамических воздействий от ведения взрывных работ.

Современный подход к решению безремонтного поддержания выработок в течение всего срока их эксплуатации основывается на максимальном использовании несущей способности окружающего массива при активном его вовлечении в работу системы "крепь – порода". Обеспечение устойчивости выработок в сложных горно-геологических условиях, наряду с проведением специальных профилактических мероприятий, может быть достигнуто посредством применения облегченных типов крепи; при этом необходимо использовать элементы нового австрийского метода строительства тоннелей (НАМТ).

Выполненные натурные исследования показывают техническую возможность использования способа неразрушающего контроля в подземных выработках и свидетельствуют о его эффективности для оперативного и долговременного контроля прочностных характеристик монолитной бетонной и набрызгбетонной крепей. Внедрение системы комплексного мониторинга крепи в определенной степени позволит решить вопросы обеспечения безопасности ведения горных работ.

Литература

- Запорожец В.Ю., Смирнов Ю.Г., Орлов А.О. Крепление горных выработок на подземных рудниках ОАО "Апатит". Горный журнал. 2004. № 9. С. 56-58.
- Конухин В.П., Смирнов Ю.Г., Орлов А.О. Контроль прочности бетона неразрушающим методом в период строительства хранилища реакторных отсеков. Бетон и железобетон. 2009. № 3. С. 28-30.
- Орлов А.О., Смирнов Ю.Г. Контроль прочности бетонной крепи как способ обеспечения безопасности при эксплуатации горных выработок. Безопасность труда в промышленности. 2009. № 6. С. 28-30.
- Орлов А.О., Смирнов Ю.Г. Мониторинг прочности набрызгбетонной крепи в горизонтальных выработках. Безопасность труда в промышленности. 2014. № 4. С. 28-30.
- Смирнов Ю.Г., Орлов А.О. Развитие современных технологий крепления на горнорудных предприятиях Хибин. Метро и тоннели. 2014. № 6. С. 26-28.

References

- Zaporozhets V.Yu., Smirnov Yu.G., Orlov A.O.** Kreplenie gorniyh vyirabotok na podzemnyih rudnikah OAO "Apatit" [Excavation support in underground mines of OAO "Apatit"]. Gornyy zhurnal. 2004. N 9. P. 56-58.
- Konuhin V.P., Smirnov Yu.G., Orlov A.O.** Kontrol prochnosti betona nerazrushayuschim metodom v period stroitelstva hranilisha reaktornyih otsekov [Control the strength of concrete non-destructive method during construction storage of reactor compartments]. Beton i zhelezobeton. 2009. N 3. P. 28-30.
- Orlov A.O., Smirnov Yu.G.** Kontrol prochnosti betonnoy krepki kak sposob obespecheniya bezopasnosti pri ekspluatatsii gorniyh vyirabotok [Control the strength of the concrete lining as a way to ensure the safety of mines' operation]. Bezopasnost truda v promyshlennosti. 2009. N 6. P. 28-30.
- Orlov A.O., Smirnov Yu.G.** Monitoring prochnosti nabryzgbetonnoy krepki v gorizontalnyih vyirabotkakh [Monitoring strength of shotcrete lining in horizontal workings]. Bezopasnost truda v promyshlennosti. 2014. N 4. P. 28-30.
- Smirnov Yu.G., Orlov A.O.** Razvitie sovremennyih tehnologiy krepleniya na gornorudnyih predpriyatiyah Hibirin [The development of modern lining technology in mining enterprises of Khibiny]. Metro i tonneli. 2014. N 6. P. 26-28.

Информация об авторах

Смирнов Юрий Геннадьевич – Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; Кольский филиал ПетрГУ, кафедра горного дела и обогащения, ст. преподаватель, e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru

Smirnov Yu.G. – Mining Institute KSC RAS, Scientific Researcher; Kola Branch of Petrozavodsk State University, Department of mining and beneficiation, Senior Lecturer, e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru

Орлов Александр Орестович – Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник, e-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru

Orlov A.O. – Mining Institute KSC RAS, Scientific Researcher, e-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru