УДК 338.28

Е.Л. Карибжанова, М.М. Мисюра, Д.Ю. Савон, А.Е. Сафронов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБОГАЩЕНИЯ И ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Рассмотрены перспективные направления совершенствования процесса обогащения и глубокой переработки полезных ископаемых, вопросы социально-экономической эффективности инноваций, экологические проблемы и риски. Раскрыты аспекты снижения энергоемкости дезинтеграции минеральных комплексов, перспективные направления развития рудоподготовки, включая технологии с применением энергоэкономичных конусных дробилок, а также включение элементов предварительной концентрации. Рассмотрены направления развития гравитацигонных методов разделения. Обращано внимание на применение сепараторов с бегущим магнитным полем, а также на перспективные разработки в сфере совершенствования технологии флотации, в том числе пути решения проблемы селективного разделения минералов с близкими технологическими свойствами при тонкой вкрапленности. Проанализированы проблемы и направления процессов обогащения алмазов, наиболее перспективными из которых выступают реализация концепции фабрик предварительного обогащения и развитие технологии предварительного обогащения алмазоносной руды методом быстрых меченых нейтронов. Отмечено, что инновации в сфере процесса обогащения алмазов, внедряемые АК «Алроса», являются безусловным ориентиром для инновационного развития отрасли. Установлено, что одним из наиболее перспективных направлений совершенствования процессов глубокой переработки полезных ископаемых выступает рост их экологичности, заключающийся, прежде всего, в снижении ущерба окружающей среде.

Ключевые слова: полезные ископаемые, обогащение полезных ископаемых, глубокая переработка, инновации, экологические риски, обогащение алмазов, фабрики предварительного обогащения, метод быстрых меченых нейтронов.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-161-169

Во все эпохи, полезные ископаемые оставались одним из важнейших элементов природного богатства нашей планеты. Следует, при этом, отметить такие важные характеристики рудных и топливных ресурсов, как невозобновляемость и ограниченность, а также крайне медленное воспроизводство в естественных условиях, детерминированное процессами продолжающейся геологической эволюции. В частности, воспроизводство рудных и топливных полезных ископаемых в тысячи раз медленнее темпов их фактического потребления [1], практически не может его компенсировать и подчеркивает необходимость бережного отношения к этим ресурсам при добыче, переработке и использовании минерального сырья. Между тем, формально неизбежный дефицит этих ресурсов на самом деле не является фатальной угрозой. В частности, непрерывное совершенствование процесса обогащения и глубокой переработки полезных ископае-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 161–169.
© Е.Л. Карибжанова, М.М. Мисюра, Д.Ю. Савон, А.Е. Сафронов. 2017.

мых позволяет вовлекать в систему использования минеральных ресурсов месторождений с низким качеством сырья [2—4].

Добыча полезных ископаемых и обрабатывающая промышленность являются значимыми важнейшими отраслями российской экономики, фактически, в силу своей доли доходов в ВВП России, обеспечивая существование и других отраслей. Экспортная выручка от продажи полезных ископаемых, в частности нефти и газа, а также продукции обрабатывающей промышленности, без учета пищевой и легкой промышленности превышает 70% от общего объема экспорта [5, 6].

По данным Росстата, с 1999 г. по 2015 г. включительно, наблюдался рост производства полезных ископаемых, единственное исключение составил 2009 г. Так, в 2015 г. индекс производства по виду экономической деятельности «Добыча полезных ископаемых» составил 100,3% к предыдущему году. В отдельные годы (2000, 2002, 2004) прирост добычи полезных ископаемых превышал 6%. Добыча каменного угля по итогам 2015 г. выросла на 4,4% по сравнению с аналогичным периодом прошлого года, добыча бурого угля увеличилась на 7,5% (к АППГ), добыча и агломерация торфа сократилась на 19% (к АППГ). Добыча сырой нефти и природного газа выросла на 0,2%, добыча урановой и ториевой руд — на 0,1%. Добыча и обогащение железных руд выросла на 1,1%, руд цветных металлов — на 3% [7].

РФ занимает лидирующее место по ресурсам ключевых видов полезных ископаемых, которые являются востребованными мировой промышленностью. Это повышает и без того существенную востребованность инноваций в сфере обогащения и глубокой переработки полезных ископаемых, направленных на повышение их технологичности и значительное улучшение экономических показателей. В настоящее время и в ближайшей перспективе руды минерально-сырьевой базы России и всего мира характеризуется все более трудной обогатимостью. Это связано с низким содержанием целевого компонента в руде, его тонкой вкрапленностью, сложным многокомпонентным вещественным составом, а также повышенной твердостью руды (из-за углубления горных работ), что затрудняет вскрытие минеральных частиц.

Охарактеризуем вкратце новые методы обогащения и переработки полезных ископаемых. Дезинтеграция минеральных комплексов — наиболее энергоемкая операция в технологии переработки. На нее затрачивается до 10% всей вырабатываемой в мире электроэнергии [8]. Поэтому важнейшей задачей является снижение расхода энергии на дробление и измельчение руд.

В области рудоподготовки в последние годы определились два основных направления развития:

- технология рудного полусамоизмельчения (ПСИ) с додрабливанием в конусных дробилках и в валковых дробилках высокого давления (ВДВД);
- конкурирующая с ней технология стадиального дробления с последующим сверхтонким дроблением в конусных инерционных дробилках и ВДВД, реализующих селективную дезинтеграцию частиц в слое материала.

Технологии рудоподготовки с применением современных энергоэкономичных конусных дробилок способны обеспечить дробление руды до крупности 10—12 мм для последующего измельчения, а с применением ВДВД и до крупности 3 мм [9]. Для мелкого дробления перспективно применение конусных нерционных дробилок и ВДВД, так как в этих аппаратах разрушение зерен в большой степени происходит в условиях объемно-

го сжатия, что обеспечивает интергранулярное разрушение сростков минералов при уменьшении энергетических затрат.

Во всех вариантах в технологию рудоподготовки включаются элементы предварительной концентрации. В настоящее время она проводится, в основном, методами тяжелосредной или сухой магнитной сепарации. Перспективными являются радиометрические методы опробования, сортировки и сепарации.

В современных условиях основным направлением развития гравитационных методов разделения стала разработка технологий и аппаратов для обогащения тонкозернистых и тонкодисперсных материалов.

Крупнозернистые и кусковые материалы разделяются традиционными методами гравитационного обогащения — сепарацией в тяжелых суспензиях, отсадкой, концентрацией в потоках жидкости и т.д. Для разделения тонкодисперсных материалов исследованиями и практикой показана перспективность использования центробежных сепараторов различных типов. Широкое распространение получили центробежные концентраторы, которые имеют большую удельную производительность при высокой степени концентрации [10].

Новым направлением совершенствования технологии обогащения магнетитовых руд является применение сепараторов с бегущим магнитным полем. Промышленная эксплуатация сепараторов с вращающейся магнитной системой показала высокую эффективность и хорошую селективность разделения.

При переработке руд сложного вещественного состава основным методом обогащения тонкодисперсного сырья является флотация, с помощью которой ежегодно обогащается 2 млрд т полезных ископаемых. Обогатительные фабрики оснащены, в основном, механическими и пневмомеханическими флотационными машинами. Однако, в последние годы все больше широкое применение стали находить крупногабаритные пневмомеханические и пневматические колонные машины, обеспечивающие повышение удельной производительности и снижение капитальных и эксплуатационных затрат. Колонные пневматические флотационные машины, вместимость которых достигает 500 м^3 и более, имеют различные устройства аэрирования пульпы, их аэрационные системы непрерывно совершенствуются с целью создания оптимальной диспергации воздуха и необходимых гидродинамических условий для эффективного разделения частиц в широком диапазоне крупности. Проведенные широкие исследования и опыт промышленной эксплуатации на ряде объектов показали перспективность применения пульсационной аэрации для повышения производительности флотационных машин и улучшения качества разделения [11].

При разработке конструкций новых и модернизации используемых флотационных машин большое внимание уделяется автоматическому регулированию их работы и удобству обслуживания. Особое место в системах управления процессом флотации занимает разработанный в последнее время метод «технического зрения». С помощью этого метода можно обеспечить контроль скорости движения пенного слоя, размер и распределение пузырей на его поверхности, стабильность схода пенного продукта, степень минерализации воздушных пузырьков.

Проблема селективного разделения минералов с близкими технологическими свойствами при тонкой вкрапленности решается, в основном, использованием реагентов направленного действия, а также путем избирательного изменения технологических свойств минералов, оптимизации свойств среды разделения,

динамических условий протекания разделительного процесса, с помощью различных энергетических воздействий [12].

Один из главных методов обогащения, флотация, происходит в водной среде. Здесь решающую роль играют физико-химические закономерности взаимодействия твердой, жидкой и газовой фаз. Эти взаимодействия регулируются добавлением в процесс химических веществ — флотационных реагентов, которые в остаточной концентрации, при использовании оборотной воды, нарушают оптимальные физико-химические характеристики флотационной среды, что приводит к ухудшению результатов флотации. Кроме того, в случае сброса отработанных растворов в природную среду, необходимо их обезвреживание.

В ИПКОН РАН разработана промышленная технология и созданы аппараты электрохимического метода водоподготовки, позволяющего без использования химических реагентов, за счет электролитического разложения воды, изменять окислительно-восстановительные свойства, ионный и газовый состав воды и, тем самым, усиливать контрастность свойств минералов. Как отмечается в публикациях, «результаты промышленных испытаний на рудах цветных металлов, апатитовых и алмазосодержащих показали, что при электрохимическом кондиционировании флотационной среды вдвое снижается расход флотационных реагентов, улучшается качество концентратов, повышается извлечение из руд ценных компонентов» [13].

Рассмотрим далее проблемы и перспективные направления процессов обогащения и глубокой переработки полезных ископаемых по такому виду рудных полезных ископаемых, как алмазы.

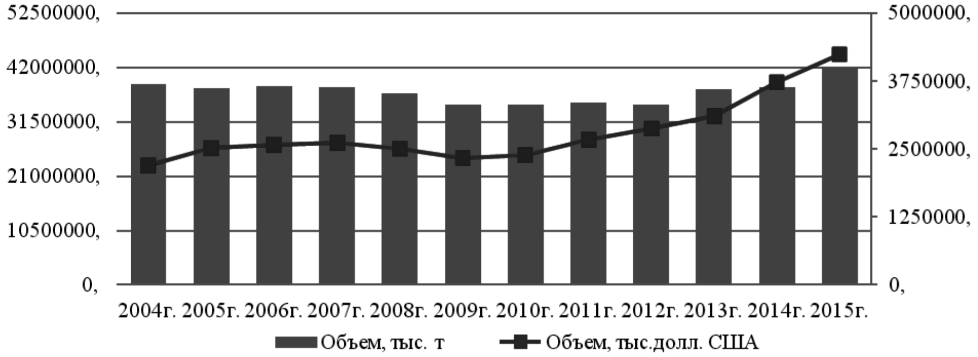
На мировом алмазном рынке в ближайшее десятилетие намечается дефицит предложения природных алмазов. Основным ограничением выступает минерально–сырьевая база мировой алмазодобычи.

Актуальность вопросов развития процессов обогащения и глубокой переработки природного сырья в сфере добычи алмазов обусловлена тем, что, хотя доля разведанных запасов алмазов (45%), существенно превосходит долю площади суши, приходящейся на Россию (11,5%), значительное число рудников крайне бедны, а применяемые технологии обогащения не характеризуются высокой экономичность, и, напротив, характеризуются многочисленными экологическими рисками. При этом, затраты при эксплуатации алмазорудных месторождений возрастают, поскольку в настоящее время происходит постепенный переход от открытой к подземной добыче руды на многих месторождениях. Доля запасов, пригодных для подземной отработки, составляет около 50—70% запасов РФ. Удельные затраты на подземную добычу кратно превышают затраты на открытую добычу, в том числе из-за снижения интенсивности горных работ. Вдобавок использование инфраструктуры открытых горных работ при переходе к подземным работам является проблематичным.

Динамика добычи алмазов в РФ остается достаточно нестабильной (рисунок), в том числе, по причинам, изложенным выше.

Наибольшую долю в запасах в РФ (45%) составляют беднотоварные месторождения (товар в тонне менее 50 долл.) [1]. Для освоения этой группы месторождений необходимы более совершенные технологии, чем используемые в алмазодобывающей промышленности в настоящее время.

В результате, одной из важнейших задач промышленной политики Российской Федерации на современном этапе представляется преодоление технологического отставания от ведущих добы-



Динамика производства алмазов в РФ в натуральном (тыс. т) и стоимостном (тыс. дол. США) выражении) [14]

вающих стран в вопросах добычи, обогащения алмазов, утилизации отходов добывающих предприятий.

В сфере обогащения алмазов, программа инновационного и технологического развития крупнейшего алмазодобывающего предприятия России — АК «Алроса», выделяет следующие направления совершенствования технологических процессов:

• разработка новых типов сепараторов;

• разработка технологий сухого (безводного) обогащения;

• разработка энергоэффективных технологий дезинтеграции алмазоносной руды;

• разработка кристаллосберегающих технологий;

• реализации концепции фабрик предварительного обогащения;

• внедрение мероприятий по увеличению добычи мелких классов, вовлечению в отработку хвостов обогатительных фабрик и спецотвалов.

К существенному снижению затрат по освоению беднотоварных месторождений приводит реализация концепции фабрик предварительного обогащения:

• первичное обогащение необходимо производить на борту карьера, что возможно за счет использования технологий рентгеновского и иных излучений, и приводит к существенной экономии на транспортных издержках от карьера до стационарных обогатительных фабрик;

• фабрика предварительного обогащения должна быть мобильной, для экономии при переходе горных работ с одного карьера на другой, в том числе и за счет отказа от строительства стационарного здания с отопительной системой;

• предварительное обогащение должно базироваться на технологиях сухого (безводного) обогащения, что позволяет исключить такие гидротехнические сооружения как пульпонасосные станции, хвостохранилища и водоемы чистой воды;

• использование энергоэффективных технологий дезинтеграции алмазной руды может привести к снижению числа переделов в процессах рудоподготовки и обогащения;

• кристаллосберегающие технологии в процессе добычи и обогащения руды позволяют уменьшить техногенную повреждаемость и повысить качество алмазной продукции.

Горно-обогатительные комбинаты могут достичь дополнительного экономического эффекта за счет внедрения мероприятий по увеличению добычи мелких классов, вовлечения в отработку хвостов обогатительных фабрик и спецотвалов.

Другим перспективным направлением совершенствования процесса обога-

щения алмазов выступает развитие технологии предварительного обогащения алмазоносной руды методом быстрых меченых нейтронов. В данном направлении АК «Алроса» сотрудничает с резидентом фонда «Сколково» ООО «Диамант» — дочерним обществом ООО «Нейтронные технологии» (г. Дубна).

Метод меченых нейтронов (ММН) позволяет обнаружить алмаз внутри куска кимберлита без его предварительного разрушения, с последующим извлечением ценного компонента в щадящих условиях. При этом, возможно использование данного метода как в «классической» технологии, так и в технологии «сухого» обогащения, что в перспективе позволит снизить транспортные расходы, уменьшить энергетические затраты, а также снизить капитальные вложения при строительстве (реконструкции или модернизации) обогатительных фабрик и драг. Испытание прототипа установки ММН проходили в июле-сентябре 2015 г. на кимберлитовой руде месторождения им. М.В. Ломоносова в условиях обогатительного комплекса Поморской ГРЭ ОАО «Севералмаз».

Следует подчеркнуть, что инновации в сфере процесса обогащения алмазов, внедряемые АК «Алроса», являются безусловным ориентиром для инновационного развития отрасли.

В завершение публикации хотелось бы отметить, что важнейшим аспектом совершенствования процессов обогащения и глубокой переработки полезных ископаемых, в частности, алмазов, выступает рост их экологичности, заключающийся, прежде всего, в снижении ущерба окружающей среде. Требования экологичности, безусловно, нередко вступают в противоречие с требованиями экономической и социальной целесообразности и эффективности процессов обогащения и глубокой переработки полезных ископаемых. Рост требований к экологической безопасности и ресурсосбережению, в том числе минимизация объемов отвалов и хвостохранилищ, освобождение хвостов от экологически опасных компонентов, максимальное использование отвальных пород и хвостов для рекультивации, производства закладочных и строительных материалов, применение замкнутых циклов оборотного водоснабжения, максимальные осветление и очистка оборотных и сточных вод.

В то же время, однако, существенно сблизить соответствующие научные и практические разработки и требования экологической безопасности позволяет учет экологических требований уже на этапе проектирования соответствующих инновационных технологий. Следует также подчеркнуть и то обстоятельство, что «зеленая» экономика имманентно содержит многочисленные идеи для инновационных разработок, в том числе в сфере процесса обогащения и глубокой переработки полезных ископаемых.

Таким образом, ухудшение обогатимости минерального сырья неизбежно приводит к усложнению технологии его переработки, и повышению эксплуатационных затрат, а также, во многих случаях, к заметному снижению содержания полезных компонентов в готовой продукции и их извлечения концентраты. При этом резко возрастает необходимое количество продукции, и повышаются требования к ее качеству, ужесточаются условия экологической безопасности.

Указанные обстоятельства диктуют требования при создании новых обогатительных процессов: повышение селективности раскрытия минеральных комплексов, производительности и эффективности обогащения, возможность разделения тонкодисперсных (микро- и нано-) компонентов, комплексность использования сырья, снижение количества отходов и их обезвреживание.

Так, наиболее перспективными направлениями совершенствования обогащения алмазов выступают реализация концепции фабрик предварительного обогащения и развитие технологии предварительного обогащения алмазоносной руды методом быстрых меченых нейтронов.

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования процесса обогащения и глубокой переработки полезных ископаемых, в частности, алмазов, выступает рост экологичности данных процессов, заключающийся, прежде всего, в снижении ущерба окружающей среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году». [Электронный ресурс]. URL: http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=143955. Режим доступа: свободный, дата обращения: 29.01.2017.
2. *Костюхин Ю. Ю.* Повышение производительности труда в угольной отрасли // Горный журнал. — 2016. — № 10. — С. 41—44.
3. *Костюхин Ю. Ю., Савон Д. Ю. и др.* Императивы эффективности производства. — М.: НИТУ «МИСиС», 2016.
4. Мак Алистер Стив, *Самосий Д. А.* Центробежные концентраторы с периодической разгрузкой Falcon SB (третье поколение). [Электронный ресурс]. URL: https://zolotodb.ru/articles/metallurgy/separation/11399. Режим доступа: свободный, дата обращения: 13.01.2017.
5. *Пешкова М. Х., Савон Д. Ю.* Механизм государственно-частного партнерства при эколого-экономической оценке техногенных минеральных объектов // Горный журнал. — 2016. — № 10. — С. 37—41.
6. *Программа* инновационного развития и технологической модернизации «АК «АЛРОСА» (ОАО) на период 2011—2018 гг. (редакция 2013 г.). Паспорт. — Мирный, 2014. — 26 с.
7. *Промышленное* производство: Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/industrial/#. Режим доступа: свободный, дата обращения: 13.01.2017.
8. *Рогов Н. Н.* Результаты испытаний установки по поиску алмазов в кимберлите методом меченых нейтронов на Ломоносовском ГОК ОАО «Севералмаз». [Электронный ресурс]. URL: http://dubna-oez.ru/images/data/gallery/209_5875__ispitaniy_ustanovki_po_poisku_almazov_v_kimberlite.pdf. Режим доступа: свободный, дата обращения: 29.01.2017.
9. *Савон Д. Ю., Лапатина С. И.* Пути повышения производительности работ в горной промышленности при внедрении инновационных технологий наклонного подъема автосамосвалов открытого карьера / Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Т. 2. — Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2016. — С. 217—220.
10. *Тулупов А. С.* Понятие «ущерб» в экономике природопользования // Научный вестник Московского государственного горного университета. — 2013. — № 11. — С. 297—302.
11. *Тулупов А. С.* Теория ущерба как база оценки и регулирования негативных экстерналий в экологическом страховании. диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук. — М.: ГУУ, 2013. — 395 с.
12. *Чантурия В. А.* Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 12. [Электронный ресурс]. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-protsessy-v-tehnologiyah-pererabotki-mineralnogo-syrya-slozhnogo-veschestvennogo-sostava. Режим доступа: свободный, дата обращения: 13.01.2017.
13. *Чантурия В. А., Козлов А. П., Матвеева Т. Н., Лавриненко А. А.* Инновационные технологии и процессы извлечения ценных компонентов из нетрадиционного, труднообогатимого и техногенного минерального сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 5. — С. 144—156.
14. *Kimberley* Process. Rough diamond statistics. [Электронный ресурс]. URL: https://kimberleyprocessstatistics.org/public_statistics. Режим доступа: свободный, дата обращения: 29.01.2017. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Карибжанова Елена Люсьеновна — аспирант,
e-mail: karibjanova@mail.ru, МГРИ-РГГРУ,
Мисюра Марина Михайловна[1] — магистр,
e-mail: marity84@mail.ru,
Савон Диана Юрьевна[1] — доктор экономических наук,
профессор, e-mail: di199@yandex.ru,
Сафронов Андрей Евгеньевич — доктор экономических наук,
профессор, e-mail: rgash@mail.ru,
Донской государственный технический университет,
[1] НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 161–169.

UDC 338.28

E.L. Karibzhanova, M.M. Misyura, D.Yu. Savon, A.E. Safronov

IMPROVEMENT OF MINERAL PROCESSING AND DEEP CONVERSION TECHNIQUE

In spotlight are the promising ways of improving mineral dressing and deep conversion process. The review of advancement in the mineral processing and deep conversion systems and processes should take into account that development and efficient use of mineral resources is the most important aspect in the the energy preparedness and economic security of our country at the modern stage. On the other hand, the processes of mineral dressing and deep conversion are imposed with the increasingly more stringent ecology and safety standards.

The scope of the discussion embraces the issues of socio-economic efficiency of investment, ecological challenges and risks. The aspects of reduction in energy consumption by mineral disintegration processes and the promising lines of development in ore pretreatment, including the use of energy-efficient cone crushers and elements of preliminary concentration, are revealed. Potential developments in the sphere of gravity separation are examined. Attention is paid to the pulsed variable magnetic field separators and to the promising improvements in flotation technology, including selective separation of finely disseminated minerals having similar process properties. A detailed analysis is devoted to the issues and trends in development of diamond beneficiation. It is found that the challenging ways of improving diamond beneficiation processes are the implementation of the concept of preconcentration factories and pretreatment of diamond-bearing ore by fast labeled neurons. It is emphasized that the innovations introduced by ALROSA in the sphere of diamond beneficiation are the peremptory beacon for the innovative advancement in the industry. The most progressive approach to improving deep conversion of minerals is the higher ecofriendliness, which means, first of all, mitigation of the environmental damage.

Key words: mineral resources, mineral processing, deep processing, innovation, environmental risks, enrichment of diamonds, pre-enrichment plants, fast method of tagged neutrons.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-161-169

AUTHORS

Karibzhanova E.L., Graduate Student,
e-mail: karibjanova@mail.ru,
Russian State Geological Prospecting University
named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU),
117997, Moscow, Russia,

Misyura M.M.[1], Magister, e-mail: marity84@mail.ru,
Savon D.Yu.[1], Doctor of Economical Sciences, Professor,
e-mail: di199@yandex.ru,
Safronov A.E., Doctor of Economical Sciences, Professor,
e-mail: rgash@mail.ru, Don State Technical University,
344006, Rostov-on-Don, Russia,
[1] National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2015 godu»*, available at: http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=143955 (accessed 29.01.2017).

2. Kostyukhin Yu. Yu. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 10, pp. 41—44.

3. Kostyukhin Yu. Yu., Savon D. Yu. *Imperativy effektivnosti proizvodstva* (The imperatives of production efficiency), Moscow, NITU «MISiS», 2016.

4. Mak Alister Stiv, Samosiy D. A. *Tsentrobezhnye kontsentratory s periodicheskoy razgruzkoy Falcon SB (tret'e pokolenie)*, available at: https://zolotodb.ru/articles/metallurgy/separation/11399 (accessed 13.01.2017).

5. Peshkova M. Kh., Savon D. Yu. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 10, pp. 37—41.

6. Programma innovatsionnogo razvitiya i tekhnologicheskoy modernizatsii «AK «ALROSA» (OAO) na period 2011—2018 gg. (redaktsiya 2013 g.). Pasport (Program of innovative development and technological modernization «AK «ALROSA» (JSC) for the period 2011—2018. (Revised 2013). Passport), Mirnyy, 2014, 26 p.

7. *Promyshlennoe proizvodstvo: Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki*, available at: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/industrial/# (accessed 13.01.2017).

8. Rogov N. N. *Rezul'taty ispytaniy ustanovki po poisku almazov v kimberlite metodom mechenykh neytronov na Lomonosovskom GOK OAO «Severalmaz»*, available at: http://dubna-oez.ru/images/data/gallery/209_5875__ispitaniy_ustanovki_po_poisku_almazov_v_kimberlite.pdf (accessed 29.01.2017).

9. Savon D. Yu., Lapatina S. I. *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo. Materialy trinadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. T. 2 (Modern problems of mining and metallurgical complex. Science and production materials thirteenth All-Russian scientific-practical conference with international participation, vol. 2), Staryy Oskol, STI NITU «MISiS», 2016, pp. 217—220.

10. Tulupov A. S. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2013, no 11, pp. 297—302.

11. Tulupov A. S. *Teoriya ushcherba kak baza otsenki i regulirovaniya negativnykh eksternaliy v ekologicheskom strakhovanii* (Theory of damage as a basis the assessment and management of negative externalities in environmental insurance), Doctor's thesis, Moscow, GUU, 2013, 395 p.

12. Chanturiya V. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no 12, available at: http://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-protsessy-v-tehnologiyah-pererabotki-mineralnogo-syrya-slozhnogo-veschestvennogo-sostava (accessed 13.01.2017).

13. Chanturiya V. A., Kozlov A. P., Matveeva T. N., Lavrinenko A. A. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no 5, pp. 144—156.

14. *Kimberley Process. Rough diamond statistics*, available at: https://kimberleyprocessstatistics.org/public_statistics (accessed 29.01.2017).