

КОЗЛОВА М. А. (ООО «Инжиниринговый Центр МФТИ»)

РЯБЦЕВ Д. А. (ООО «Инжиниринговый Центр МФТИ»)

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ КАРТИРОВАНИЮ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рассмотрены основные подходы к технологической оценке рудных месторождений на основе геолого-технологического картирования и моделирования. Подтверждена актуальность и необходимость проведения программ геолого-технологических исследований на разных стадиях изучения месторождений. Показаны основные малообъемные методы определения ключевых параметров руд, непосредственно влияющих на результативность каждой стадии переработки, с целью оценки их изменчивости в пространстве месторождения.

Ключевые слова: рудные месторождения, геолого-технологическое моделирование, малообъемное опробование, блочное моделирование, геостатистика, горнорудные проекты, геологоразведка.

Геолого-технологическое картирование как метод изучения и графического представления закономерностей пространственного размещения типов и сортов полезного ископаемого, различающихся по составу, структурно-текстурным особенностям, свойствам и соответственно технологическим характеристикам, – известно довольно давно и успешно применяется на некоторых предприятиях. Среди видов геолого-технологического картирования выделяют прогнозно-технологическое, заключающееся в составлении минералогических, геохимических, петрографических и других карт размещения факториальных признаков, и собственно технологическое, при котором картируются различные параметры переработки полезного ископаемого [1].

Обычно геолого-технологическое картирование проводится в ходе эксплуатационной разведки месторождения с целью управления качеством руды, поступающей на переработку. На ранних стадиях геологоразведочных работ, и даже на стадии ТЭО и проектирования, геолого-технологическим картированием пренебрегают. При этом главной ошибкой при проектировании фабрик, по мнению экспертов, является отсутствие представительного опробования и недостаточное исследование руды.

В отраслевых методических документах и технической литературе говорится о том, что обеспечение представительности технологических проб и распространение их исследований на запасы должны опираться на оценку изменчивости вещественного состава и технологических свойств руд [2–6],

т.е. на результаты геолого-технологического картирования.

Интенсивное развитие информационных технологий сделало возможным создание сложных технических систем, которые позволили обрабатывать огромные по сравнению с предыдущими годами объемы информации. В нашем случае речь в первую очередь идет о геологической и геохимической информации как предварительной базе знаний для технолога, включающей информацию о распределении в элементарном объеме основных компонентов в недрах, а также о характере распределения основных минеральных фаз по крупности, морфологии, состоянию поверхности, характеру срастания, качеству сростков, пористости и трещиноватости, другим структурно-фазовым параметрам [7].

Возможность обрабатывать большие массивы разнообразной информации привела к развитию в мире относительно нового направления в науках о Земле – геометаллургии (*geometallurgy*) – объединяющего геологию, минералогию, геомеханику, технологию и экологию с целью эффективной оценки проектов, оптимизации процессов добычи и переработки сырья, управления рисками горно-металлургических компаний.

В сущности, отличие международного понятия *геометаллургия* от геолого-технологического картирования заключается в современном подходе к созданию геометаллургической (геолого-технологической) модели месторождения, основанном на широком применении количественной минералогии, малообъемных тестов, блочного моделиро-



вания и методов геостатистики для планирования оптимальной отработки месторождения с использованием современного программного обеспечения.

Таким образом, применение геолого-технологического моделирования на современном уровне предполагает создание блочной модели месторождения, отображающей не только изменчивость вещественного состава руд в пространстве, но и изменчивость технологических и экономических показателей их переработки, включая потребление

электроэнергии, расход реагентов, прогнозное качество конечной продукции, а также экологические последствия. В зависимости от стадии работ (рис. 1), полученная модель используется для геолого-экономической оценки месторождения или оптимизации процессов добычи и переработки руд, в том числе для выбора последовательности отработки и схемы шихтовки с целью стабилизации работы горно-обогатительного предприятия и минимизации рисков.



Рис. 1. Применение геолого-технологического моделирования на разных стадиях существования горнорудного проекта

Реализация программы геолого-технологического моделирования позволяет повысить не только качество технологической оценки руд, но и достоверность геологического моделирования оруденения, а следовательно, и экономической оценки объектов.

Например, при моделировании месторождений золота, которые являются достаточно сложными, преимущественно используется создание трехмерных каркасов посредством ручного оконтуривания различных природных разновидностей руд (геологических доменов) на основе их литологических характеристик. При этом известно, что золоторудная минерализация не всегда контролируется исключительно типом вмещающих пород. К тому же геологические условия месторождений изменчивы по своей природе, а геологоразведочная информация о

рудном теле зачастую оказывается довольно скудной и основывается на рассеянных в пространстве дискретных данных. «Ручная» интерпретация таких данных приводит к ошибочному пониманию пространственного положения рудных тел. Ситуация усугубляется значительным разбросом значений данных опробования и присутствием проб с ураганскими содержаниями, отсутствием определенной пространственной непрерывности в распределении золота. Неравномерность распределения металла приводит к проблеме достоверности и точности данных опробования, их представительности. Ошибки в оконтуривании и особенно в определении пространственного положения оруденения и прогнозе содержаний сказываются как на воспроизводимости отдельных параметров



оценки, так и на подтверждаемости запасов по месторождению в целом.

С точки зрения экономической оценки месторождений и проектирования производственной деятельности недостаточное или неверное понимание пространственного положения оруденения и изменчивости геологических характеристик руд, а также их технологическая оценка на основе усредненных параметров приводят к неоптимальному определению масштабов производства, неудачному выбору оборудования и формированию критически уязвимых участков, необходимости переоборудования обогатительной фабрики.

Ведущую роль в создании реалистичной модели месторождения должно играть понимание генетической модели рудообразования и взаимосвязи основных рудоконтролирующих структур. Это можно получить только за счет использования всей геологической информации, от макро- до микроуровня, особенно таких важных параметров, как вещественный состав руд, их текстурно-структурные характеристики и вторичные изменения.

Таким образом, для повышения достоверности геологической, технологической и экономической оценки месторождений необходимо создание геолого-технологической модели месторождения, отражающей пространственное положение руд и изменчивость их ключевых параметров.

Фундаментом геолого-технологической модели является база данных (БД), полнота наполнения которой напрямую влияет на корректность моделирования. Полноценная БД включает информацию о литологическом и химическом составе пород, наличии и распределении вторичных изменений, степени окисления и т.п., дополненную сведениями о физико-механических свойствах пород – плотности, твердости, объемной массе, влажности, трещиноватости и др., а также минералогическими данными – гранулометрическим составом руд и характеристикой распределения минералов и полезных компонентов, прочими информативными параметрами.

В настоящее время существует множество экспрессных методов получения значительного объема исходной геологической информации при геологоразведочных работах – от проведения полноценного геотехнического каротажа до томографии керна и минералогического «каротажа» (оперативного микроскопического определения минерального состава пород и руд) (рис. 2). Использование геостатистических процедур позволяет наполнить блочную модель основными характеристиками руд и значительно повысить качество моделирования.

Характеристики руд в условиях залегания определяют результат всех дальнейших операций по их добыче и обогащению. Важно понимать ключевые параметры руд, непосредственно влияющие на результативность каждой стадии переработки, и иметь возможность оценить их изменчивость в пространстве месторождения.

Современные методы малообъемных испытаний позволяют определить технологические свойства руд на пробах небольшой массы: тесты по измельчению (SPI, SMC), стандартизированные тесты по сепарации, флотации, гидрометаллургии и др. Малый вес образцов (от 2 кг) дает возможность выполнить такие испытания для значительного количества проб, что является оптимальным условием для геолого-технологического моделирования [8, 9].

Типоморфные особенности минералов и их ассоциаций влияют на технологические показатели переработки сильнее, чем количество металлов в руде, поэтому характеристика вещественного состава руд, помимо данных о содержаниях полезных компонентов, должна содержать такие параметры, как: минеральная форма, крупность и морфология частиц, парагенетические минеральные ассоциации, массовая доля в руде, степень окисления руд, наличие минеральных компонентов, осложняющих технологию переработки. Отдельно стоит отметить изучение текстурно-структурных особенностей руд, которые имеют важное значение при их переработке. Глубокое минералогическое изучение руд позволяет также решать генетические вопросы, которые должны лежать в основе модели оруденения.



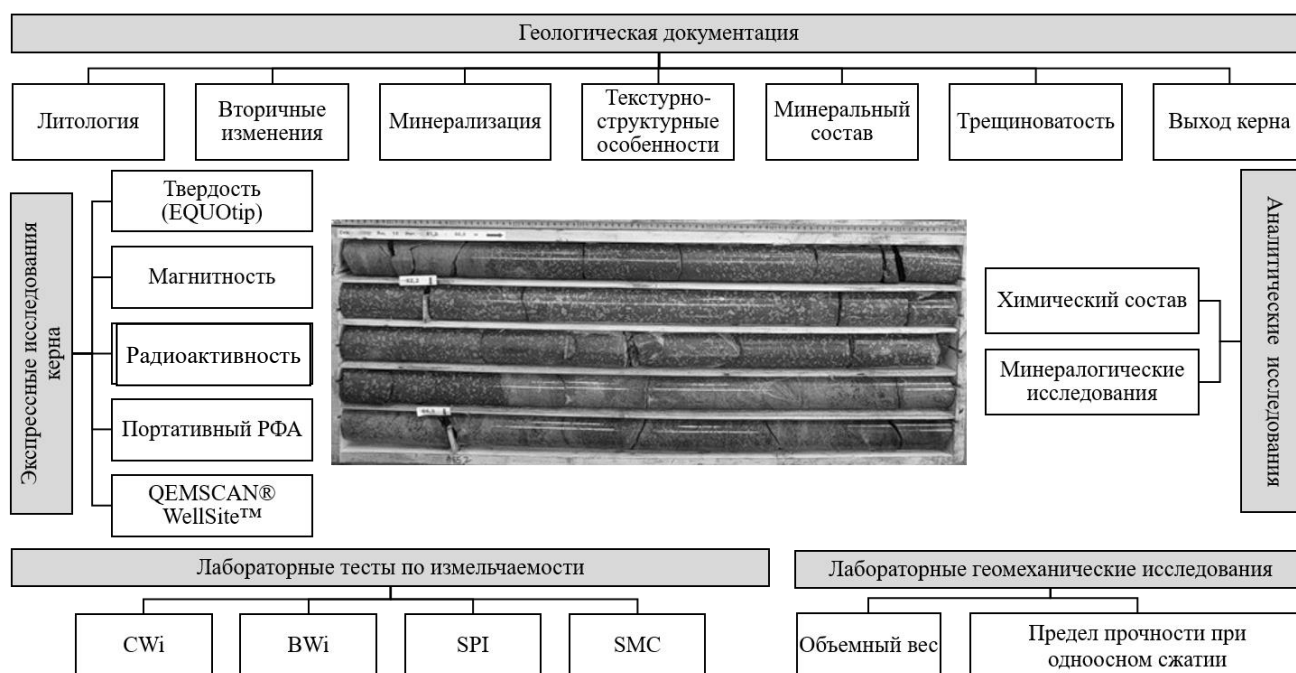


Рис. 2. Пример наполнения геолого-технологической базы данных при проведении геологоразведочных работ

Как правило, при проведении минералогических анализов руд и продуктов их переработки используют различные методы, набор и последовательность применения которых определяются необходимой степенью детальности анализа. Традиционный подход к технологическим минералогическим исследованиям отличается локальностью, значительной стоимостью и времязатратностью процесса.

В последние годы стандартом в мировой горнодобывающей промышленности становится применение технологии SEM-EDS и программных комплексов для автоматизированного минералогического анализа, которые позволяют проводить массовые, оперативные и объективные исследования, составляющие основу пространственно- и статистически достоверных данных для геолого-технологического моделирования. В результате исследований может быть получена полная характеристика вещественного состава руды и достоверный прогноз её обогащаемости на различных стадиях технологической схемы, включая количественную характеристику химического и минерального состава, графический оцифрованный список

всех частиц и составляющих их минеральных фаз, гранулометрический состав зерен и отдельных мономинеральных частиц, количественное описание сростков, ассоциаций и степени раскрытия ценных минеральных компонентов.

Одним из основных преимуществ использования автоматизированного минералогического анализа при проведении геолого-технологического моделирования является его оперативность, позволяющая обрабатывать статистически значимое количество минералогических проб, что приводит к увеличению достоверности информации и повышению надежности геостатистической обработки данных.

В разработке системы опробования и обработки проб, а также в определении путей извлечения ценных компонентов важное значение имеет понимание их распределения в рудах в естественном состоянии. Применение рентгеновской 3D микротомографии позволяет изучать внутреннее строение рудного образца по всему его объему без разрушения, давать трехмерное интроскопическое описание и измерение объектов, получать данные о фазовом составе и трехмерных

морфоструктурных характеристиках минералов.

Преимущество метода при работе например с рудами золота заключается в объемном характере исследований, что в десятки раз увеличивает количество обнаруженных золотин (в сравнении с минераграфическим анализом), дает возможность наблюдать скопления золота, отсутствующие или слабо проявленные в аншлифах, и точнее определять минеральные ассоциации (устанавливается связь золота с минералами, не выходящими на поверхность аншлифа). В сравнении с традиционными методами точнее определяются грануло- и морфометрические характеристики выделений золота в руде, ускоряется процесс анализа и повышается его достоверность [10–12].

Важные практические результаты можно получить при исследовании материала кучного выщелачивания, в т.ч. биовыщелачивания, 3D микротомографией – для объяснения темпов процесса и его регулирования, включая анализ информации о возможности проникновения выщелачивающих реагентов (связности пустот) для извлечения металлов методами скважинного подземного выщелачивания.

Данные, полученные при проведении геологоразведочных работ, результаты малообъемных технологических испытаний и минералогических исследований, интегрируются в блочную модель рудного тела и используются в качестве исходных параметров для технологического моделирования, проектирования или оптимизации работы предприятия.

Методика технологического моделирования на основе геолого-технологической модели месторождения (рис. 3) позволяет проследить причинно-следственные связи – начиная от отбойки руды и заканчивая качеством конечной товарной продукции предприятия и экологическими последствиями его деятельности. Это особенно важно, поскольку до сих пор проектирование горных работ и перерабатывающих предприятий осуществляется достаточно обособленно, что осложняет последующую их работу и достижение высоких результатов.

Таким образом, традиционный подход к оценке запасов рудных месторождений, основанный на данных химического состава руд, постепенно уходит в прошлое. Оценка месторождений с использованием минералогического подхода, основанного на изучении значительного количества минералогических проб и прогнозировании технологических свойств руды, обеспечивает наиболее полный и универсальный способ получения геолого-технологических данных [13–15]. Кроме того, это позволяет значительно сократить объемы экспериментальных технологических исследований. Для минералогического подхода количественная минералогическая информация необходима как для исходных руд, так и для продуктов их переработки.

Современный подход к геолого-технологическому моделированию позволяет:

- оценивать руды по всему комплексу знаний, не ограничиваясь исключительно содержанием полезных компонентов;
- понимать вариативность вещественного состава и сортность руд;
- производить подсчет запасов полезного ископаемого с дифференциацией по типам и сортам;
- обоснованно отбирать представительные по всем параметрам пробы отдельных типов и сортов полезного ископаемого для лабораторных полупромышленных и промышленных испытаний;
- моделировать технологическую схему переработки руд на основе многовариантного анализа и давать прогноз производственных показателей для каждого ее узла;
- дополнять и развивать созданную геолого-технологическую модель по мере изучения и освоения месторождения;
- разрабатывать на стадии проектирования горно-обогатительного комбината обоснованные схемы стабилизации качества полезного ископаемого при добыче, транспортировке, складировании, отгрузке и т.п.;
- оперативно оценивать возможности оптимизации технологической схемы в связи с изменением конъюнктуры рынка или появлением новых технологий отработки и переработки руд;



- прогнозировать технологические показатели на перспективу;

- планировать удельные расходы на переработку руд, НДС, штрафы и т.п.



Рис. 3. Основные этапы создания геолого-технологической модели месторождения

Отдельно отметим необходимость предварительной разработки Программы геолого-технологического моделирования, которая должна создаваться коллективом специалистов из всех областей знаний о рудном теле – от геологов до металлургов и экологов, с целью определения по имеющимся данным о месторождении необходимого и достаточного количества и типов исследований.

Библиографический список

1. Ершов В.В. Основы горнопромышленной геологии. – М.: Недра, 1988. – 325 с.
2. Малообъемное технологическое опробование и картирование рудных месторождений при разведке. Инструкция НСОМТИ № 1. – М.: ВИМС, 1979. – 47 с.
3. Стандарт Российского Геологического общества. Твердые полезные ископаемые и горные породы. Геолого-технологическое картирование. Методы. СТО РосГео 09-002–98. РосГео. – Москва, 1998.
4. Стандарт Российского Геологического общества. Твердые полезные ископаемые и горные породы. Технологическое опробование в процессе геологоразведочных работ.

Общие требования. СТО РосГео 09-001–98. РосГео. – Москва, 1998.

5. Технологическая оценка минерального сырья. Опробование месторождений. Характеристика сырья. Справочник / Под ред. П.Е. Остапенко. – М.: Недра, 1990. – 272 с.
6. Коц Г.А., Чернопяттов С.Ф., Шманенков И.В. Технологическое опробование и картирование месторождений. – М.: Недра, 1980. – 288 с.
7. Башлыкова Т.В., Пахомова Г.А., Лагов Б.С. и др. Технологические аспекты рационального недропользования: роль технологической оценки в развитии и управлении минерально-сырьевой базой страны / Под науч. ред. Ю.С. Карабасова. – М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2015. – 576 с.
8. Испытание на определение индекса мощности мельницы полусамозмельчения (SPI). URL: <http://www.sgs.ru/ru-RU/Mining/Metallurgy-and-Process-Design/Unit-Operations-and-Metallurgical-Services/Comminution-and-Beneficiation/SAG-Power-Index-SPI-Test.aspx> (дата обращения: 29.09.2016).



9. Hunt R., Kojovic J., Berry T. Estimating comminution indices from ore mineralogy, chemistry and drill core logging. Conference Paper. GeoMet 2013: The Second AusIMM International Geometallurgy Conference. Carlton, VIC, Australia, 2013.
10. Самородский П.Н. Исследование внутреннего строения образцов руд золота неразрушающим методом рентгеновской вычислительной микротомографии: Автореф. дис. ... к-та геол.-мин. наук. - Москва: ВНИИГеосистем, 2004. – 28 с.
11. Chetty D., Clark W., Bushell C. etc. The use of 3d x-ray computed tomography for gold location in exploration drill cores. Proceedings, 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), 1-5 August 2011, TRONDHEIM, Norway.
12. Dominy S., Xie Y., O'Connor L. Characterisation of gold from the Nick O'Time shoot (Tarnagulla, Australia) using highresolution X-

- ray computed tomography. URL: <https://www.researchgate.net/publication/303700778> (дата обращения: 14.11.16).
13. Development of the mineralogical path for geometallurgical modeling of iron ores. Mehdi Parian. Licentiate Thesis in Mineral Processing Division of Minerals and Metallurgical Engineering Luleå University of Technology SE-971 87 LULEÅ Sweden, 2015. URL: http://pure.ltu.se/portal/files/102298043/Mehdi_Parian.pdf (дата обращения: 07.10.16).
14. The geometallurgical framework. Malmberget and Mikheevskoye case studies. V. Lishchuk, P.H. Koch, C. Lund, P. Lamberg. Mining Science, vol. 22, 2015. – Pp. 57–66
15. Lamberg P. Particles – the bridge between geology and metallurgy. URL: https://pure.ltu.se/portal/files/32756151/Particles_The_Bridge_Between_Geology_and_Metallurgy.pdf (дата обращения: 29.09.2016).

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2017, No. 1, pp. 23-29	
Title:	Modern approach to geological-and-metallurgical mapping of ore deposits
Author 1	Name&Surname: Mariya Kozlova Company: MIPT Center for Engineering and Technology Address: 141700, Russia, Dolgoprudny, Pervomayskaya Street, Off. 204 5 Scientific Degree: Work position: Senior Engine, Department of Ore Minerals Contacts: kozlova.ma@cet-mipt.ru
Author 2	Name&Surname: Dmitrii Ryabtsev Company: MIPT Center for Engineering and Technology Address: 141700, Russia, Dolgoprudny, Pervomayskaya Street, Off. 204 5 Scientific Degree: Work position: Head of Department of Ore Minerals, expert of Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (SRI FRCEC)
DOI:	10.17073/2500-0632-2017-1-23-29
Abstract:	Geological-and-metallurgical mapping is carried out during operational exploration of a deposit for controlling grade of ore fed for processing. The paper is devoted to studying the main approaches to metallurgical assessment of ore deposits based on the methods of geological-and-metallurgical mapping and modeling. The relevance and necessity of conducting geological-and-metallurgical research programs at different stages of deposit exploration was confirmed. The main low-volume sample studying methods for determining key parameters of ores that directly affect on the efficiency of each stage of ore processing for assessing spatial variability of the parameters are shown. The proposed approach to geological-and-metallurgical modeling allows solving a number of problems, including: assessing ores across the entire range of knowledge (but not solely based on useful component grades); understanding the ore material composition and grade variability; estimating ore reserves with differentiation by ore type and grade.
Keywords:	ore deposits, geological and metallurgical modeling, small-volume sampling, block modeling, geostatistics, mining projects, exploration



References:

1. Ershov V.V. Osnovy gornopromyshlennoi geologii. – M.: Nedra, 1988. – 325 s.
2. Maloob"emnoe tekhnologicheskoe oprobovanie i kartirovanie rudnykh mestorozhdenii pri razvedke. Instruktsiya NSOMTI №1. M.: VIMS. 1979. 47 s.
3. Standart Rossiiskogo Geologicheskogo obshchestva. Tverdye poleznye iskopaemye i gornye porody. Geologo-tekhnologicheskoe kartirovanie. Metody. STO RosGeo 09-002-98. RosGeo. Moskva. 1998.
4. Standart Rossiiskogo Geologicheskogo obshchestva. Tverdye poleznye iskopaemye i gornye porody. Tekhnologicheskoe oprobovanie v protsesse geologorazvedochnykh rabot. Obshchie trebovaniya. STO RosGeo 09-001-98. RosGeo. Moskva. 1998.
5. Tekhnologicheskaya otsenka mineral'nogo syr'ya. Oprobovanie mestorozhdenii. Kharakteristika syr'ya. Spravochnik. Pod red. P.E. Ostapenko. M.: Nedra. 1990. 272 s.
6. Kots G.A., Chernopyatov S.F., Shmanenkov I.V. Tekhnologicheskoe oprobovanie i kartirovanie mestorozhdenii. M.: Nedra. 1980. 288 s.
7. Bashlykova T. V., Pakhomova G. A., Lagov B. S. i dr. Tekhnologicheskie aspekty ratsional'nogo nedropol'zovaniya: rol' tekhnologicheskoi otsenki v razvitii i upravlenii mineral'no-syr'evoi bazoi strany / pod nauch. red. Yu. S. Karabasova. — M.: MISiS, 2015. — 576 s.
8. Ispytanie na opredelenie indeksa moshchnosti mel'nitsy polusamoizmel'cheniya (SPI). URL: <http://www.sgs.ru/ru-RU/Mining/Metallurgy-and-Process-Design/Unit-Operations-and-Metallurgical-Services/Comminution-and-Beneficiation/SAG-Power-Index-SPI-Test.aspx> (data obrashcheniya: 29.09.2016).
9. Hunt R., Kojovic J., Berry T. Estimating comminution indices from ore mineralogy, chemistry and drill core logging. Conference Paper. GeoMet 2013: The Second AusIMM International Geometallurgy Conference. Carlton, VIC, Australia, 2013 г.
10. Samorodskii P.N. Issledovanie vnutrennego stroeniya obraztsov rud zolota nerazrushayushchim metodom rentgenovskoi vychislitel'noi mikrotomografii: Avtoref. dis. k-ta geol.-min. nauk. - Moskva: VNIIGeosistem, 2004. – 28 s.
11. Chetty D., Clark W., Bushell C. etc. The use of 3d x-ray computed tomography for gold location in exploration drill cores. Proceedings, 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), 1-5 August 2011, TRONDHEIM, Norway
12. Dominy S., Xie Y., O'Connor L. Characterisation of gold from the Nick O'Time shoot (Tarnagulla, Australia) using highresolution X-ray computed tomography. URL: <https://www.researchgate.net/publication/303700778> (дата обращения: 14.11.16)
13. Development of the mineralogical path for geometallurgical modeling of iron ores. Mehdi Parian. Licentiate Thesis in Mineral Processing Division of Minerals and Metallurgical Engineering Luleå University of Technology SE-971 87 LULEÅ Sweden, 2015. URL: http://pure.ltu.se/portal/files/102298043/Mehdi_Parian.pdf (data obrashcheniya: 07.10.16)
14. The geometallurgical framework. Malmberget and Mikheevskoye case studies. V. Lishchuk, P.H. Koch, C. Lund, P. Lamberg. Mining Science, vol. 22, 2015, стр. 57–66
15. Lamberg P. Particles – the bridge between geology and metallurgy. URL: https://pure.ltu.se/portal/files/32756151/Particles_The_Bridge_Between_Geology_and_Metallurgy.pdf (data obrashcheniya: 29.09.2016).

