DOI: *10.18454/PMI.2017.1.44*

УДК 622.331:622.22

ОТКРЫТАЯ РАЗРАБОТКА ХРАНИЛИЩА ЛИГНИНА

А.В.МИХАЙЛОВ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье обоснованы основные критерии выбора парка машин для поверхностной разработки техногенного хранилища лигнина в качестве сырья для производства топливных пеллет. Восточно-Сибирский комбинат биотехнологий ОАО «ВСКБТ» предлагает закрыть отвал гидролизного лигнина в г. Тулун Иркутской области. Отвал лигнина расположен на территории площадью 9,6 га, поверхность частично перекрыта золой. Проектом открытой разработки отвала предусматривается послойная сработка с одним выступом в течение трех лет. Производительность – 1500 т/сут или 447 000 т/год. Разработка отвала лигнина включает комплекс работ по подготовке участка к выполнению вскрышных, добычных и рекультивационных работ. Экскавированный лигнин будет складироваться на территории пеллетного завода для последующей переработки. Направление рекультивации выработанного отвала лигнина – водоем природоохранного назначения естественного заполнения и зарастания. Ликвидация отвала лигнина открытым способом соответствует открытому карьерному способу, используемому в горной промышленности. В предлагаемом парке машин основой является гусеничный болотоходный экскаватор для выемки и погрузки лигнина. Даны рекомендации по использованию конкретных видов оборудования: экскаватор Kraneks EK-270LC и тракторно-транспортные средства (колесный трактор John Deere 7730 и колесный полуприцеп ISON-8520).

***Ключевые слова*:** гидролизный лигнин, техногенный отвал, экскавация, погрузка, вывозка

***Как цитировать эту статью*:** Михайлов А.В. Открытая разработка хранилища лигнина // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 44-50. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.44

Введение. Лигнин – органическое вещество, связывающее клетки, волокна и сосуды, из которых состоит древесина. Это – самый богатый возобновляемый углеродный источник на Земле после целлюлозы. Промышленный лигнин в настоящее время получают как побочный продукт изготовления целлюлозной пульпы для бумаги и некоторых химических производных. Общее количество лигнина, извлекаемого во всем мире, оценивается более 70 млн т в год. В настоящее время лигнин используется главным образом в качестве источника энергии в производственных процессах.

Лигнин не разлагается в анаэробных условиях, которые доминируют в свалках мусора, таким образом любой захороненный лигнин остается изолированным [9]. Многие исследователи в прошлые десятилетия пытались развивать направления использования лигнина с учетом его позитивных свойств. Позитивные или продвигающие факторы при выборе лигнина [5] следующие:

- легко доступен в огромных количествах;
- высокое содержание энергии вследствие наличия ароматических ядер;
- много реактивных связей углеродного скелета, которые могут использоваться для широкого спектра замещений и дополнительных реакций;
- хорошая совместимость с рядом основных химикатов;
- хорошие адсорбционные, ионообменные и адгезивные свойства.

Однако, несмотря на усилия исследователей, относительно немного направлений практического использования лигнина были приняты в промышленных масштабах. Это объясняется в основном неоднородностью лигнина, его естественной изменчивостью, методами разделения, используемыми в промышленности. Подавляющее большинство лигнина, извлеченного в производственных процессах, сжигается в качестве топлива, чтобы возвратить энергию. Только 1-2 % лигнина используется в других направлениях [6]. Некоторые направления использования несульфатного лигнина были предложены и продемонстрированы как выполнимые, хотя и не получили развития в промышленной практике из-за отсутствия совместимого и надежного промышленного источника.

В настоящее время в России по различным оценкам от 100 до 200 млн т лигнина располагается на свалках. Лигнин хорошо гранулируется и брикетируется, поэтому иногда его добавляют к труднопрессуемому сырью, например, березовым отходам, для улучшения качества полученных гранул и брикетов. За счет меньшего содержания кислорода теплота сгорания лигнина почти в 1,5 раза выше, чем целлюлозы. В хранилищах лигнин частично распадается и снижается теплота его сгорания, но чаще всего она выше, чем у древесины. Поэтому гранулированный или бри-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.44

кетированный лигнин является хорошим топливом. Так как лигнин в больших количествах загрязняет окружающую среду и постоянно горит на свалках, то его утилизация чрезвычайно важна. Цена лигнина фактически отрицательна, поэтому производство топливных гранул и брикетов из лигнина может быть очень прибыльным бизнесом.

Разработка хранилищ отходов и восстановление территорий являются процессом, в котором твердые отходы, которые ранее были захоронены, экскавируются и перерабатываются. Главная цель этой работы состояла в том, чтобы использовать лигнин в качестве сырья для получения гранулированного топлива. В статье рассматриваются физическо-механические свойства лигнина в хранилище; технологии выемки и транспортирования лигнина на хранилище; выбор оборудования для технологий выемки и транспортировки лигнина.

Условия. Восточно-Сибирский комбинат биотехнологий (ВСКБТ) предложил закрыть хранилище лигнина близ г. Тулун Иркутской области на реке Ия (бассейн Ангары) в 390 км к северо-западу от Иркутска. Хранилище лигнина расположено в междуречье рек Азейка и Ия в 7 км к югу от ВСКБТ (рис.1). В связи с закрытием Тулунского гидролизного завода отпала необходимость в использовании хранилища лигнина. ВСКБТ предложил использовать экскавированный лигнин в качестве сырья для производства топливных пеллет.



Рис.1. Расположение хранилища лигнина и пеллетного завода в г. Тулун

Климат района резко континентальный с продолжительной зимой и теплым коротким летом. Среднемесячная температура января составляет –22,3 °С, июля – +17,8 °С. Абсолютный минимум температуры в январе –51 °С, абсолютный максимум в июле +37 °С. Среднемноголетняя продолжительность безморозного периода в Тулуне составляет 75 дней. Период с отрицательными среднемесячными температурами воздуха продолжается с октября по апрель. Количество осадков за ноябрь – март составляет 60 мм. Количество осадков за апрель – октябрь составляет 344 мм.

Наибольшая глубина промерзания почвы 2,96 м на оголенной поверхности, 1,96 м под естественном покровом, толщина снежного покрова достигает 0,8 м. Средняя высота снежного покрова за зиму 0,3-0,4 м. Ветры преобладают долинные северо-западного и юго-восточного направлений. Скорости ветра достигают наибольших значений в весенний период (апрель, май) – до 3,2-3,4 м/с, реже до 15 м/с, преобладающий ветер северо-восточный.

Описание проекта. Тулунский проект расценивается как ключевой для демонстрации жизнеспособности проектов разработки хранилищ отходов и восстановления территорий в России. Проект показателен для расширенной разработки хранилищ отходов и восстановления территорий, отличающейся от обычной добычи отходов и имеющей тенденцию совмещения производства топливного потока, полученного из отходов.

Территория площадью 9,6 га долгое время использовалась под хранилище гидролизного лигнина и золы. Хранилище было организовано в 1991 г., толщина слоя лигнина – 7,5-22,0 м, объем – 1 223 000 м^3.

Проектом предлагается круглогодовая открытая разработка хранилища лигнина в течение трех лет. Производительность 1500 т/сут или 447 000 т/год. Экскавированный лигнин складируется в штабели на территории пеллетного завода для последующей переработки. Проектом пре-

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.44*

дусматривается сооружение искусственного водоема на месте хранилища. В плане хранилище представляет собой овал протяженностью с северо-запада на юго-восток 460 м и с юго-запада на северо-восток 250 м.

Физические характеристики лигнина в отвале. Главная цель исследования лигнина состояла в получении и осмыслении геотехнической информации о грунтовых условиях, требуемых для производства земляных работ.

Лабораторные испытания были проведены с ненарушенными образцами лигнина. Тесты, связанные с определением физических и механических свойств, были проведены в лабораториях Санкт-Петербургского горного университета. Результаты лабораторных испытаний образцов лигнина:

Поверхностная засоренность, %	5
Коэффициент фильтрации в хранилище/в штабеле, м/сут	0,2/26,9
Угол трения, град.	41-45
Средний размер частиц, мм	0,67
Плотность лигнина, кг/м^3	0,94
Плотность твердой фазы, кг/м^3	0,39
Плотность частиц лигнина, кг/м^3	2,00
Коэффициент пористости	4,19
Влажность, %	64,8

Гранулометрический состав экскавированного лигнина является важным параметром для процесса выемки, организации восстановления территории, особенно для калибровки оборудования механической сепарации и размола на заводе по производству пеллет, такого, как грохоты, магнитные сепараторы и молотковые дробилки.

Гранулометрический состав экскавированного лигнина показан ниже:

Классы крупности, мм	>5	2-5	1-2	0,5-1,0	0,25-0,5	0,10-0,25	Поддон	Всего
Содержание классов в пробе, %	1,49	3,83	7,34	22,60	25,90	29,50	9,82	100

Полевая оценка проходимости по отвалу лигнина. Несущая способность или сцепление поверхности хранилища лигнина определяет его способность проходимости оборудования во время выемки и транспортировки лигнина. В полевых условиях прочность на сдвиг обычно измеряется с использованием конического пенетрометра или сдвигомера-крыльчатки [12].

Одна из классификаций проходимости основана на количестве проходов, возможных в определенных условиях. Технический предел проходимости – один проход, в этом случае наносится значимый вред окружающей среде, оборудование расходует большое количество топлива. Обычно поступательная скорость транспортного агрегата низкая, масса перевозимого груза минимальная, следовательно, производительность на транспортных работах становится низкой. Кроме того, есть высокий риск буксования и полного застревания в грунте транспортно-тракторного агрегата и, как следствие, большие затраты на вытаскивание. Эксплуатационная эффективность улучшается как функция количества ожидаемых проходов, и 2-5 предельных прохода могут быть установлены как самый низкий экономический предел проходимости для транспортно-тракторного агрегата. Условия с природоохранной точки зрения могут быть классифицированы как хорошие, если возможны 25 проходов техники по колее (табл.1) [13].

Таблица 1

Природоохранная классификация проходимости, основанная на количестве проходов

Количество проходов	Технический предел	Условия проходимости
1-3	Невозможно	Неудовлетворительно
3-5		Неудовлетворительно
6-10	Экономично	Удовлетворительно
11-25		Хорошо
25	Благоприятно для окружающей среды	Отлично

Исследования влияния частоты транспортных проходов на уплотнение лигнина [1] показывают, что основная часть уплотнения происходит во время первых нескольких проходов транс-

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.44*

портного средства (рис.2). Последующие проходы дают меньший эффект [4], но могут увеличить уровни плотности и уменьшить некапиллярную пористость грунта [3].

Последующие исследования включают тестирование на месте – тесты с конусным пенетрометром и сдвигомером-крыльчаткой, обычно используемые для определения проходимости транспортных средств по почве и бездорожью [10, 13, 15].

Прочность на сдвиг и сопротивление зондированию конуса зависят от различных факторов, включая структуру почвы, содержание органического вещества, насыпную плотность и, самое главное, влажность почвы [14]. Сопротивление зондированию конуса (конический индекс *CI*), прочность на сдвиг τ и модуль деформации *E* являются параметрами, используемыми в классификации прочности почв (табл.2), разработанной в соответствии с Eco Wood Operations Protocol для экоэффективной заготовки древесины на слабых грунтах [11]. Каждый из этих параметров может быть измерен в полевых условиях портативным оборудованием. Прочность почвы определяет несущую способность и тяговую способность, в итоге – проходимость почвы.

Полевой эксперимент по экскавации и штабелированию лигнина показан на рис.3.

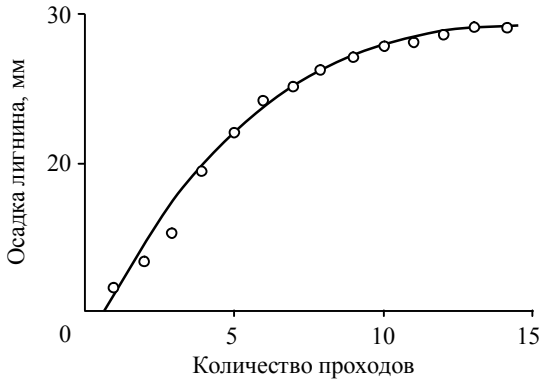


Рис.2. Осадка лигнина под колесами транспортно-тракторного агрегата в зависимости от количества проходов



Рис.3. Эксперимент по экскавации и штабелированию лигнина

Несущая способность почвы обычно рассматривается как максимальное допустимое давление колеса в зоне контакта. Фактическое давление колеса трудно поддается оценке, потому что истинная область контакта зависит от параметров шин и свойств почвы [13]. В классификации прочности почвы EcoWood оценка допускаемой несущей способности почвы (связывается с давлением транспортных средств) является основой при определении номинального давления на грунт.

Таблица 2

Классификация почв по прочности (Eco Wood) и прочность лигнина

Прочность		Параметры прочности			Допускаемая несущая способность *NGP*, кПа
Классы почвы	Характеристика почвы	*CI*, кПа	*E*, МПа	τ, кПа	
1	Прочная	>500	60	>60	>80
2	Средняя	300-500	20-60	20-60	60-80
3	Мягкая	<300	<20	<20	40-60
Лигнин	Мягкая	252	0,79	32	40-60

Модуль упругости зависит от консистенции и плотности лигнина как упругого техногенного слежавшегося в хранилище мягкого грунта.

У этой технологии есть несколько различных компонентов, которые могут быть изменены для адаптации к особенностям местных условий. Условия площадки позволяют применять тяжелое оборудование для проведения экскавации. Характеристики материала также определяют условия экскавации. На удаленном предприятии должен существовать способ удаления грунта с площадки и транспортировки его на переработку. Экскавация и транспортирование могут прово-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.44

диться в любых климатических условиях, однако фактические полевые работы обычно зависят от времени года. Следует учитывать гидрогеологию площадки, высокий уровень грунтовых вод может препятствовать экскавации.

У выемочно-транспортных технологий есть ряд преимуществ:

• неизменность;
• непосредственный результат для вывоза;
• легкая осуществимость;
• легкий длительный мониторинг и организационный контроль;
• гибкость.

Экскавация и транспорт предлагают много преимуществ альтернативной переработки отходов. Главное преимущество состоит в том, что это постоянный способ, источник загрязнения в отвале техногенных отходов устраняется, тем самым снижаются острые и хронические риски для человека и окружающей среды. При экскавации техногенного грунта ликвидируется и сам источник негативного воздействия, так как отсутствует промежуток времени, требуемый для технологий переработки [8].

Выемка лигнина. Этот метод экскавации используется для удаления больших количеств лигнина на переменных глубинах и большой площади. Экскавация хвостохранилищ и восстановление земель являются потенциальными методами для переработки отходов на старых хвостохранилищах. Восстановление ресурсов – одна из выгодных областей получения прибыли в подобных проектах. Процесс открытой разработки отвала лигнина состоит из выемки загрязненного грунта и перевозки его в штабели за пределы отвала с использованием шести тракторно-транспортных агрегатов.

Насыпной грунт беспорядочно отсыпан, производится селективная разработка грунта. Разработанный в отвале насыпной грунт складируется в штабели для последующей обратной засыпки при рекультивации территории хранилища. Пылевые выбросы на отвале лигнина не вызывают проблем, поскольку лигнин по материалам исследований является влажным и твердым. Разработка лигнина не сопровождается запахом. Отмечено распространение частиц лигнина колесами транспортных средств при вывозе с территории хранилища. Для ликвидации подобного загрязнения предусмотрена мойка колес автомобилей и тракторов.

Хранилище разрабатывается одним уступом высотой 4 м в направлении с севера на юг. Проектом принята транспортная однобортовая продольно-поперечная система разработки отвала. Отработка лигнина ведется с юго-восточной части отвала и далее по простиранию отвала до предела материала в слое горизонта.

Экскавированный лигнин загружается экскаватором в полуприцепы и доставляется на пеллетный завод. Дальность вывоза 7 км. Заготавливаемое количество лигнина по годам разработки приведено в табл.3.

Таблица 3

Заготавливаемое плановое валовое количество лигнина по годам разработки

Зимний период, м^3				Летний период, м^3				Всего в период разработки, тыс. м^3
1-й год	2-й год	3-й год	Всего	1-й год	2-й год	3-й год	Всего	
117,50	223,25	223,25	564,0	132,50	251,75	251,75	636,0	1200,0
Суточная производительность, м^3								
1762,5				1766,6				

Проектом принята продольная система разработки (однобортовая) при перемещении фронта вскрышных и добычных работ параллельно длинной оси хранилища лигнина. При выемке первого горизонта на втором происходит подсушка поверхности лигнина. В зимний период промерзание верхнего слоя лигнина происходит на глубину 0,5 м. Затем экскаватор переводится на поверхность второго горизонта и операции повторяются.

Оборудование включает фронтальный погрузчик и гидравлический экскаватор или их комбинацию (табл.4). Типы используемого оборудования и условия окружающей среды определяют затраты времени (человеко-часы и машино-часы), необходимые для выполнения объема работ.

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.44*

Каждый элемент оборудования специально предназначен для выполнения определенных механических задач. Выбор оборудования основан на операционной эффективности и доступности на рынке.

Разработка отвала лигнина проводится с использованием методов, подобных используемым для открытых горных работ на торфяных месторождениях. В этом проекте экскаватор является самым важным элементом оборудования для разработки отвала лигнина. Выбор экскаватора определяется его эффективностью, относительно низкой стоимостью, возможностью быстрого перемещения значительной массы материалов и эксплуатации на многих типах ландшафта. Конкретный метод разработки определяет выбор типов выемочно-погрузочного и транспортного оборудования с учетом условий окружающей среды.

Таблица 4

Оборудование для разработки отвала лигнина

Оборудование	Модель	Количество	Операции
Экскаватор	Kraneks EK-270LC	1	Экскавация лигнина и погрузка в полуприцепы
Трактор + полуприцеп	John Deere 7730 + ISON-8520	6 6	Транспортирование экскавированного лигнина на пеллетный завод и транспортирование насыпных грунтов в штабель для складирования
Бульдозер	T10MB	1	Перемещение и штабелирование насыпных грунтов. Устройство дорог
Фронтальный погрузчик	Amkodor 342P-01	1	Экскавация насыпных грунтов и погрузка в полуприцепы

Выбор оборудования является одним из самых важных аспектов для проектов открытой разработки. Количество и мощность оборудования определяют затраты на добычу. Выбор оборудования определяет экономическую жизнеспособность операций [2]. Для выбора гидравлических экскаваторов в комбинации с тракторными полуприцепами должны быть определены критерии отбора оборудования, которые объединятся в три категории: производственные критерии; параметры отвала лигнина; параметры оборудования.

Различные авторы используют удельное давление на грунт (NGP) в качестве индикатора проходимости оборудования [7].

Результаты исследования показали, что подход к описанию проходимости транспортного средства по поверхности хранилища лигнина описывает прочность поверхности лигнина и обеспечивает хорошую основу для обоснования проходимости оборудования в системе оценки разработки хранилищ лигнина открытым способом.

Заключение. Разработка хранилищ отходов и рекультивация территорий – развивающаяся технология и метод утилизации отходов. Концепция разработки хранилищ отходов и рекультивации территорий и связанные с этим технологии заслуживают серьезного внимания.

В этой работе репрезентативные пробы лигнина были взяты из хранилища лигнина Тулунского гидролизного завода в Иркутской области, которое функционировало с 1991 по 2007 годы. На основе этих образцов были определены и статистически проанализированы характеристики лигнина. Подобные данные отсутствуют в научной литературе. Доля мелких частиц составляет приблизительно 80 % массы лигнина, и является самой большой частью экскавированного материала. Результаты исследования показали, что подход к описанию проходимости транспортного средства по поверхности плотного лигнина описывает прочность поверхности лигнина и обеспечивает хорошую основу для разработки системы оценки проходимости по лигнину при открытых горных работах. Значения сопротивления внедрению конуса и сопротивления на сдвиг, определенные в этом исследовании, не согласуются с классами прочности почв по классификации EcoWood и указывают, что лигнин в хранилище является упругим техногенным уплотненным мягким грунтом.

Представленные технические разработки могут быть основанием для научных обсуждений с целью экспертизы и развития новых технологий для открытой разработки хранилищ лигнина. Метод разработки хранилища лигнина с современным оборудованием был проверен в реальных условиях. При разработке хранилища лигнина могут быть использованы технологии открытых горных работ при добыче торфа. Результатом применения этой технологии является экономия за

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.44*

счет роста производительности, что является важным фактором для конкурентоспособности лигнина как сырья при производстве гранулированного топлива.

Методология направления рекультивации хранилищ лигнина, используемая в этом исследовании, может быть рекомендована для исследований других хранилищ лигнина. В конечном итоге территория восстанавливается в качестве устойчивого природного парка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Телего А.В.* Обоснование проходимости транспортно-тракторного агрегата при разработке органогенного сырья / А.В.Телего, А.В.Михайлов, А.В.Большунов // Записки Горного института. 2014. Т. 209. С. 87-90.

2. *Aghajani A.* Application of AHP-TOPSIS method for loading-haulage equipment selection in open pit mines / A.Aghajani, M.Osanloo // XXVII International Mining Convention. Mexico, 2007.

3. *Burger J.A.* Impact of tracked and rubber-tired tractors on a forest soil / J.A.Burger, J.V.Perumpral, R.E.Kreh, J.L.Torbert, S.Minaei // Trans ASAE. 1985. № 28. P. 369-373.

4. *Hatchell G.E.* Soil disturbances in logging: Effects on soil characteristics and growth of loblolly pine in the Atlantic Coastal Plain // G.E.Hatchell, C.W.Ralston, R.R.Foil // J. For. 1970. № 68. P. 772-775.

5. *Lindberg J.J.* Specialty polymers from lignin / J.J.Lindberg, T.A.Kuusela, K.Levon // Lignin: Properties and Materials. ACS Symposium Series. № 397. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1989. P. 190-204.

6. *Lora J.H.* Recent industrial applications of lignin: A sustainable alternative to non-renewable materials / J.H.Lora, W.G.Glasser // Journal of Polymers and the Environment. 2002. № 10(1-2). P. 39-48.

7. *Mikhailov A.* Peat surface mining methods and equipment selection // Mine Planning and Equipment Selection: Proceedings of the 22nd MPES Conference. Dresden, Germany, 14th-19th October 2013. 2014. XXVII. Vol. 2. P. 1243-1249.

8. Mining waste treatment technology selection. Excavation and Disposal of Solid Mining Waste. URL: http://www.itrcweb.org/miningwaste-guidance/to_excavation.htm. (Date of access 21.05.2015).

9. *Morton A. Barlaz*. Carbon sequestration in landfills: Documentation from field samples / North Carolina State University, 2014. URL:http://erefdn.org/index.php/grants/fundedresearchinfo/carbon_sequestration_in_landfills_documentation_from_field_samples. (Date of access 21.02.2015).

10. *Porsinsky T.* Wheel numeric as parameter for assessing environmental acceptability of vehicles for timber extraction / T.Porsinsky, D.Horvat // Mova mehanizacija sumarstva. 2005. № 26. P. 25-38.

11. *Porsinsky T.* Comparison of two approaches to soil strength classifications / T.Porsinsky, M.Sraka, I.Stankic // Croatian Journal of Forest Engineering. 2006. № 27(1). P. 17-26.

12. Review of factors affecting disturbance, compaction and trafficability of soils with particular reference to timber harvesting in the forests of south-west Western Australia: Consultants report to Department of Conservation and Land Management, Western Australia // M.A.Rab, F.J.Bradshaw, R.G.Campbell, S.Murphy. Sustainable Forest Management Series. SFM technical report. 2005. N 2. 146 p.

13. *Saarilahti M.* Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package N 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD). EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources), 2002. P. 1-87.

14. *Saarilahti M.* Dynamic terrain classification: modelling of the seasonal variation of the trafficability on forest sites. Soil interaction model. Appendix report. 2002. № 1. P. 1-22.

15. *Shoop S.A.* Terrain characterization for trafficability. US Army Corps of Engineers – Cold Regions Research & Engineering Laboratory. CRREL report. 1993. № 93-6. P. 1-30.

Автор **А.В.Михайлов,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *epc68@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 10.10.2016.