УДК 622.00

Г.А.ХОЛОДНЯКОВ, *д-р техн. наук, профессор, verahol@bk.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

G.A.KHOLODNJAKOV, *Dr. in eng. sc., professor, verahol@bk.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ «РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ» В ОБЛАСТИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Предложены новые подходы к проектированию малоотходной открытой разработки комплексных месторождений полезных ископаемых с использованием современных критериев эффективности горных работ при определении основных параметров карьера. Определены основные технологические и экологические характеристики рудопотока технологического регламента для условий открытой разработки Озерного полиметаллического месторождения, находящегося недалеко от особо охраняемой зоны оз. Байкал.

***Ключевые слова*:** карьер, малоотходная разработка, коэффициент добычи, складирование, технологический процесс, техногенное месторождение, оптовая цена, товарная продукция.

MAIN RESEARCH RESULTS OF SCIENTIFIC SCHOOL «DEVELOPMENT OF DEPOSITS OF SOLID MINERALS» IN OPEN CAST MINING

New approaches to the design of low-waste opencast mining of complex mineral deposits using modern mining efficiency criteria in determining the main parameters of a opencast. The main technological and environmental characteristics flow of ore technological requirements for opencast mining environment of the Ozerny polymetallic deposit, located near specially protected zone of lake Baikal.

***Key words*:** opencast, development of low-waste, getting ratio, storage operation, process, technogenic deposit, wholesale price, commodity products.

Становление научной школы открытых горных работ в Горном университете следует связать с работой профессоров П.И.Городецкого (1902-1960) и А.И.Арсентьева (1918-2012), посвятивших свои исследования определению производительности и границ карьеров, разрабатывающих однородные месторождения полезных ископаемых.

В настоящее время 75 % полезных ископаемых в мире добывается более экономичным открытым способом. Однако при этом одновременно извлекают миллиарды тонн вскрышных пород, которые вывозят в отвалы, где они загрязняются, теряют свою ценность и способствуют повышению загрязнения окружающей среды. Сохранение окружающей среды при росте объемов добычи может быть обеспечено за счет новых принципов проектирования и разработки месторождений, новых малоотходных технологий добычи, а также максимально возможного использования вскрышных пород, которые в настоящее время занимают огромные территории, омертвляют землю, загрязняют воздух. Возможность промышленного использования различных горных пород карьерного поля характеризует комплексность месторождения, разрабатываемого открытым способом.

Технолого-минералогическая оценка всего объема горной массы, извлекаемой из карьерного поля, позволила обосновать новые концепции месторождения полезных ископаемых как объекта разработки его карьером, заключающиеся в отказе от понятия вскрышные породы, в представлении обо всей горной массе как о полезных ископаемых и горных породах – отходах производства, учете комплексности всех месторождений, представляющих собой источник добычи не одного, а многих минеральных ресурсов в условиях стремления к безотходной и малоотходной технологиям. Однако при проектировании карьеров чаще всего комплексность месторождения не учитывается, так как используются методики, разработанные в основе своей в 30-40-х гг. прошлого века при отраслевой организации горно-добывающей промышленности для месторождений однородного состава. В качестве основного показателя эффективности работы карьера используется коэффициент вскрыши – отношение количества вскрышных пород V к количеству добываемого полезного ископаемого A.

При наличии в карьерном поле нескольких видов полезных ископаемых различной ценности этот показатель, широко используемый при определении границ карьера, направления развития, производительности и режима горных работ, становится недостаточно информативным, а порою и вообще теряет смысл.

Более современным, объективным и удобным показателем эффективности открытых горных работ является выход различных горных пород с единицы горной массы Q, который для полезных ископаемых представляет собой коэффициент добычи каждого из них, а для горных пород – отходов карьера – коэффициент отходов. Для случая разработки месторождения однородного состава (с одним полезным ископаемым) между коэффициентами добычи K и вскрыши n имеется аналитическая связь

$$K = A/Q = A/(A+V) = 1/(1+V/A) = 1/(1+n).$$

Таким образом, предложенный показатель не отрицает возможности использования традиционного коэффициента вскрыши, но лишь для открытой разработки месторождений однородного состава.

Объем добычи попутных полезных ископаемых в карьере зависит от производительности по основному из них, направления развития и режима горных работ. При стабильной производительности по основному полезному ископаемому и горной массе практически невозможно получить постоянную производительность по попутным полезным ископаемым. Эту стабилизацию целесообразно осуществлять при помощи формирования складов для каждого полезного ископаемого. Склады в данном случае используются как аккумулирующие емкости, куда направляется избыток добытого в карьере попутного полезного ископаемого и откуда в определенные периоды деятельности предприятия поступает потребителю часть полезного ископаемого, компенсируя снижение добычи в карьере.

Малоотходная разработка месторождения определяется стремлением к наиболее полному использованию горных пород карьерного поля. Некоторые из них могут стать полезными ископаемыми со временем, поэтому необходимо их упорядоченное размещение в специально отведенных местах внутри карьера или на его борту.

Склад приобретает многоцелевое назначение: его использование ведет к повышению интенсивности и комплексности разработки месторождения, он является средством для увеличения при необходимости производительности карьера, буферным устройством между карьером и обогатительной фабрикой, средством стабилизации производительности по полезным ископаемым, служит для сортировки и усреднения качественного состава полезного ископаемого, служит хранилищем временно неиспользуемых горных пород (отходов карьерного производства) и перегрузочным пунктом с одного вида транспорта на другой.

Таким образом, отказ от устаревшего технологического процесса отвалообразования в пользу более современного складирования временно не используемых горных

пород, а также многоцелевое назначение складов предопределяют совершенно новый подход к теории и практике организации заключительного технологического процесса в карьере. Именно складирование горных пород, а не отвалообразование предполагает формирование техногенных месторождений в соответствии с представленной схемой (см. рисунок).

Полезных и ценных компонентов в техногенных месторождениях порой бывает больше, чем в рудах, а продукция из них дешевле в 2-4 раза, чем из естественного месторождения, при сроке окупаемости капитальных вложений не больше 2-2,5 лет.

Для последних десятилетий характерен гигантский рост потребления энергетических и минеральных ресурсов: угля, нефти, газа, рудных и нерудных полезных ископаемых. При этом создается масса отходов, что существенно сказывается на экологическом состоянии отдельных регионов. Эти отходы могут быть использованы в будущем, а частью и в настоящее время как дополнительный источник минерального сырья, т.е. техногенных месторождений. Суммарное содержание полезных компонентов, которые накапливаются в техногенных месторождениях за 20-30 лет, сопоставимо, а иногда и превышает их количество в ежегодно добываемых рудах. Более перспективными по содержанию и запасам полезных компонентов по сравнению с месторождениями-отвалами горно-добывающих предприятий являются хвосты обогащения руд черных и цветных металлов. Таким образом, техногенные месторождения перспективны для вовлечения в разработку и могут обеспечить увеличение запасов минерально-сырьевого комплекса, сократить затраты на обогащение и попутную добычу руды.

При определении границ карьера необходимо учитывать тот факт, что извлечение из карьерного поля не одного, а нескольких полезных ископаемых приводит к увеличению их общей ценности и возможностей открытого способа разработки.

Анализ исследований по определению рационального направления углубки показал, что в настоящее время разработаны аналитические и графоаналитические методы, учитывающие влияние способа вскрытия месторождения, принятую технологию разработки, изменение качественного состава руд, влияние потерь и засорения и т.д. Графоаналитическим способом решаются плоская и объемная задачи определения направления углубки карьера, разрабатывающего однородные месторождения любой конфигурации. В качестве критерия при этом используется минимум среднего с начала отработки коэффициента вскрыши. Однако этот метод определения направления углубки мало пригоден для карьеров, разрабатывающих комплексные месторождения.

Для комплексных месторождений следует учитывать, что они состоят из нескольких полезных ископаемых, в каждом из которых содержится и может быть извлечено

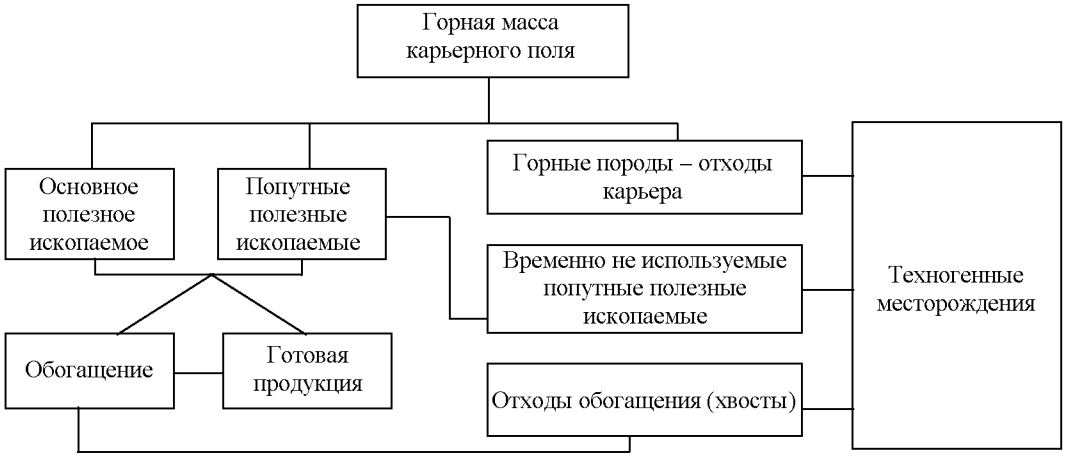


Рис.1. Концептуальная схема формирования техногенных месторождений – складов горных пород карьеров

несколько полезных компонентов различной ценности. Рациональному направлению развития горных работ будет соответствовать минимум коэффициента расхода горной массы на единицу извлекаемой ценности в течение всего периода эксплуатации карьера или минимальный объем горной массы при максимальной извлекаемой из недр ценности. Чем больше горных пород карьерного поля может быть реализовано на рынках минерального сырья, тем больше извлекаемая из них ценность. Затраты на добычу и переработку пород не должны превышать суммы извлекаемой ценности.

Достичь максимума извлекаемой ценности в определенный период эксплуатации карьера можно за счет более интенсивной отработки балансовых запасов каждого полезного ископаемого, т.е. за счет максимальной по горным и экономическим возможностям производительности карьера по каждому полезному ископаемому с учетом спроса на сырье. Рациональное направление углубки соответствует интенсификации разработки комплексного месторождения открытым способом. Применительно к комплексному месторождению определение направления углубки должно осуществляться методом изолиний ценности полезных ископаемых. Для построения изолиний ценности используются извлекаемые приведенные ценности для рыночных условий, которые определяются по индексу оптовых цен. Этот индикатор международной финансовой деятельности, рекомендуемый Международным валютным фондом, отражает изменение цен на различных стадиях производства и является средней взвешенной индексов цен.

Одной из проблем проектирования и эксплуатации комплексных месторождений полезных ископаемых является распределение общекарьерных затрат З на каждый вид полезного ископаемого. Возможные способы отнесения этих затрат на себестоимость отдельных видов полезных ископаемых при разработке комплексных месторождений подразделяются на две группы: методы исключения (списания затрат) и методы распределения затрат. Метод исключения затрат не устанавливает производственные затраты по отдельным видам полезных ископаемых, а относит все затраты на один основной продукт, что затрудняет анализ себестоимости и снижает эффективность внутрипроизводственного хозяйственного расчета. Этот способ может применяться при условии, что доля попутных полезных ископаемых в общей стоимости выпускаемой продукции незначительна.

Наиболее объективным представляется метод распределения затрат пропорционально отпускной стоимости выпускаемой продукции. Этот метод предполагает использование действующих оптовых цен, отражающих действительные затраты общественно необходимого труда на производство продукции, себестоимость индивидуальных производств. Оптовые цены скорректированы на процент рентабельности, а также себестоимость заменяемого продукта. Таким образом, затраты на добычу различных видов полезных ископаемых $З_i$ необходимо рассчитывать пропорционально объемам их выемки A_i и отпускной стоимости C_i:

$$З_i = З A_i C_i / A C_{ср},$$

где A – общий объем добычи различных полезных ископаемых; $C_{ср}$ – усредненная отпускная стоимость единицы полезного ископаемого,

$$C_{ср} = \sum_{i=1}^{n} A_i C_i / \sum_{i=1}^{n} A_i .$$

Для типичного в настоящее время случая разработки месторождения однородного состава, когда из карьерного поля извлекается лишь одно полезное ископаемое ($i = 1$), а остальные породы являются отходами, $A_i / A = 1$ и $C_i / C_{ср} = 1$. Тогда $З_i = З$, т.е. все общекарьерные затраты относятся на одно полезное ископаемое.

При максимальном использовании горных пород комплексного месторождения общекарьерные затраты возрастают, но удельные (на добычу каждого полезного ископаемого) уменьшаются и обусловливают для каждого из них рентный эффект, что стимулирует предприятие к малоотходной разработке.

Теоретически обоснованные предложенные концепции определения основных параметров карьеров, эксплуатирующих комплексные месторождения полезных ископаемых, применяются при оценке целесообразности инвестирования, проектирования, строительства и эксплуатации горных предприятий в условиях рыночной модели экономики и необходимости охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

Рекомендуемые методы проектирования карьеров не отрицают действующих в настоящее время, так как носят более общий характер и в частном случае сводятся к обычным методам, характерным для месторождений однородного состава.

Современное концепции проектирования послужили основой для определения параметров открытой разработки месторождения полиметаллических руд Озерное, расположенного в республике Бурятия в 350 км от особо охраняемой зоны оз. Байкал. Освоение месторождения включает в себя строительство карьера и обогатительного комплекса, организацию складирования отходов производства, развитие инфраструктуры района. В результате обогащения планируется получение цинкового, свинцового и пиритового концентратов.

Озерное месторождение расположено на южном склоне пологой возвышенности. Абсолютные отметки поверхности от 1180 до 1272 м Местность залесенная, местами заболоченная. Поверхностные водотоки практически отсутствуют. В 0,5 км к юго-западу от месторождения находится падь Гурвунур, по которой протекает речка Гундуй-Холой, имеющая непостоянный сток с максимальным расходом 10-15 л/с в период дождей. В зимнее время речка полностью промерзает.

Отметка дна карьера колеблется от 950 до 1070 м. Наименьшая глубина составляет 140 м, а наибольшая 360 м. Длина карьера по поверхности 2675 м, а ширина 950 м.

Вскрытие карьерного поля рекомендуется производить с двух его торцов: северо-западного с отметки +1230 м, юго-восточного с отметки +1210 м. В отличие от проекта, предполагающего интенсивное (в первые 5 лет) развитие северо-западной части карьера, горные работы необходимо начинать одновременно с обоих торцов. Это позволит при скорости углубки 14-15 м/год через 9-10 лет достичь дна юго-восточной части карьера на отметке +1070 м. С этого момента выработанное пространство юго-восточной части карьера можно использовать для размещения вскрышных пород, извлекаемых в оставшийся период эксплуатации месторождения (13-15 лет).

Вскрытие нагорных частей карьера производится полутраншеями с наиболее возвышенных частей горизонтов по рельефу. В ходе углубки карьера формируются две наклонные транспортные бермы, которые при значительной вытянутости карьера в плане позволят разделить транспортные потоки на вскрышной и рудный.

Для снижения объема горно-подготовительных работ разрезные траншеи с шириной по дну 3 м проходят 5-метровыми слоями с помощью гидравлических экскаваторов типа обратная лопата, работающих с нижним черпанием.

Руда с содержанием $Zn > 2{,}2$ %, считается богатой и будет отправляться на фабрику, а руда с содержанием $Zn < 2{,}2$ % (бедная) – на склад бедной руды. На склады также будут направляться сидеритовые и баритовые руды.

Высота уступа принимается по руде 5 м, по вскрышным породам 10 м. Минимальная ширина рабочих площадок определена, исходя из конструктивных параметров применяемого горно-транспортного оборудования, требований ЕПБ на открытых горных работах и СНиП 2.05.07-91* и составляет 30 м.

В соответствии с техническим заданием производительность карьера должна обеспечивать работу обогатительной фабрики по переработке богатой руды в количестве 6000 тыс.т/год. Рассчитанная по горно-техническим возможностям производительность карьера по богатой руде обеспечивает такую производительность фабрики. Кроме богатой руды, из карьера добывается бедная руда, сидеритовая и баритовая руды, которые отправляются на соответствующие

склады. Объемы эксплуатационных запасов богатой руды обеспечивают работу карьера и фабрики в течение 23-25 лет. Режим работы карьера вахтовый, 364 рабочих дней в году, по две смены в сутки продолжительностью по 12 ч.

Исходя из горно-технических условий эксплуатации принята система разработки с транспортированием породы во внешние отвалы, а с 11-го года – в выработанное пространство юго-восточной части карьера.

Руды и породы Озерного месторождения – скальные. Категория пород по трудности экскавации IV, по буримости IX. Подготовка породы к выемке осуществляется буровзрывным способом.

Горные работы производятся одновременно на двух-трех уступах. Для снижения потерь и засорения руды вскрытие горизонтов по горным породам предусматривается со стороны висячего бока залежи полезного ископаемого.

Основное и вспомогательное бурение осуществляется буровыми станками ROC L8 и DM45HP («Atlas-Copco», Швеция). На основном бурении принят диаметр скважин на руде 130 мм, на породе 172 мм, как оптимальный по совокупности затрат на БВР, на вспомогательном (заоткоска уступов на предельном контуре) 110 мм.

Экскавация горной массы предусматривается экскаваторами типа PC 1800-6 («Komatsu», прямая лопата) и PC 1250-7 («Komatsu», обратная лопата).

На рабочих площадках уступов (обеспечение оптимальной формы забоя взорванной горной массы и отбитой руды для эффективной работы погрузчика и др.) предусмотрен гусеничный бульдозер типа «Komatsu» D-275 A-5.

На добычных и вскрышных работах используются экскаваторы PC 1250-7 («Komatsu», обратная лопата, емкость ковша 5,1 м^3) с производительностью 2856 м^3/смену и PC 1800-6 («Komatsu», прямая лопата, емкость ковша 11 м^3) с производительность 5686 м^3/смену.

На вспомогательных работах в карьере (зачистка площадок и дорог) применяется бульдозер на базе трактора Т-170 с производительностью 840 м^3/смену при средней дальности перемещении породы 30 м.

Для транспортировки горной массы из карьера предусматрено использование автосамосвалов «Komatsu» HD785-5 (грузоподъемность 91 т).

Для транспортировки бедной руды, а также сидеритовой и баритовой руд планируется применять автомобильный транспорт с доставкой их на соответствующие склады, расположенные в 1,5-2,0 км от борта карьера.

Богатая руда из карьера автосамосвалами «Komatsu» HD785-5 (грузоподъемность 91 т) доставляется на склад руды, расположенный вблизи обогатительной фабрики, находящейся в 2,5 км от северо-восточного борта карьера. Размер доставляемого куска горной массы не превышает 750 мм, куски размером более 750 мм дробятся в карьере гидромолотом «Rammer» S-56 на базе экскаватора ЭО-5126. Все дальнейшие этапы дробления и сепарации руды производятся на обогатительной фабрике.

На расчетный год (год выхода на проектную производительность 6000 тыс.т богатой руды) для транспортировки горной массы используются автосамосвалы «Komatsu» HD785-5: для богатой руды – семь единиц, бедной руды – четыре, породы – 31.

На Озерном ГОКе предполагается организация внешнего и внутреннего отвалообразования вскрышных пород. В первые 10 лет задействован будет только внешний отвал на юго-западной стороне карьера. В конечном положении его объем составит 100,1 млн м^3. С 11-го года эксплуатации месторождения карьер достигнет своей конечной глубины на отметке +1070 м в юго-восточной его части. Образованное выработанное пространство можно использовать для внутреннего отвалообразования вскрышных пород. На окончание горных работ его объем составит 59,53 млн м^3. Топографические особенности месторождения предопределили устройство внешнего нагорного отвала вскрышных пород. При этом предусмотрено формирование отвала сверху вниз бульдозерами типа «Komatsu» L-275 A-5 с использованием на вспомогательных работах бульдозера на базе трактора Т-170.

Территория размещения внешнего отвала вскрышных пород и складов различных руд защищается от притока поверхностных вод нагорными водоотводными канавами.

Размещение внешних отвалов вскрышных пород предусмотрено за пределами контура карьеров на площадях, исключающих засыпку перспективных для разведки и эксплуатации участков. Подотвальные площади представлены безрудными склонами обвально-обсыпного и осыпного характера, а также склонами со скудными островками травы и мха.

Склады временно не востребованных бедной, сидернтовой и баритовой руд располагаются на расстоянии 1,5-2,0 км к северу от карьера. Формирование складов осуществляется с помощью погрузчиков типа CAT-988G (США). Складирование горных пород (отходов карьера) обеспечивает как сохранение качественных и количественных характеристик пород, так и возможность их последующей отработки с минимальными затратами. Можно выделить три группы складов горных пород. К первой группе относятся техногенные месторождения, которые размещаются отдельно друг от друга без примыкания. Данная группа характерна тем, что она зависит только от возможности селективной отработки в карьере и наличия больших отвальных площадок. Ко второй группе относятся техногенные месторождения, размещаемые с примыканием друг к другу. При этом выделяются две подгруппы, отличающиеся условиями примыкания в плане или по высоте. Техногенные месторождения третьей группы скомпонованы с учетом комбинаций первых двух групп.

Для складов горных пород должны составляться паспорта. Для Озерного ГОКа в паспорте следует указать виды получаемой товарной продукции при разработке техногенных месторождений:

• бедная руда – при совершенствовании технологии обогащения возможно получение цинкового, свинцового и других попутных полезных компонентов;

• сидеритовая руда, содержащая карбонат железа $FeCO_3$, – после обогащения может стать сырьем для получения железного концентрата с содержанием Fe не менее 30-35 %.

• баритовая руда – может быть подвергнута обогащению для получения концентрата для нужд нефте- и газодобывающей промышленности в качестве утяжелителя глинистых растворов при бурении скважин. Кроме того, барит может быть использован как наполнитель в бумажной, резиновой, лакокрасочной и цементной промышленности.

Выбор конструкции склада техногенного месторождения должен производиться с помощью экономической оценки по интегральному критерию затрат $З_{П}^{Т}$ за определенный период времени:

$$З_{П}^{Т} = \sum_{t=1}^{T}(КE_{Н} + C)\beta_t - \sum_{r=1}^{R}П\beta_r \rightarrow \min ,$$

где T – период формирования техногенного месторождения, годы; K – капитальные затраты, руб.; $E_н$ – норма дисконта; C – эксплуатационные расходы, руб.; П – прибыль от реализации техногенного месторождения, руб.; r и R – начало и окончание отработки техногенного месторождения; B_t, B_r – коэффициенты учета фактора времени методом сложных процентов.

В основу представленного метода экономической оценки положено определение только дополнительных затрат по сравнению с традиционным валовым способом отвалообразования с учетом ущерба от экологических последствий и их окупаемость во времени за счет реализации прибыли при отработке техногенного месторождения.

Другой важной проблемой является паспортизация складов горных пород – отходов карьера. Этот документ должен включать в себя описание склада техногенного месторождения, технологию складирования и возможную технологию разработки склада в будущем.

При формировании техногенных месторождений в процессе складирования осуществляется не просто селективное складирование пород, а формируются объекты, обеспечивающие как сохранение качественных и количественных характеристик пород, так и возможность их последующей отработки с минимальными затратами.

Эффективность работы горно-добывающих, обогатительных и перерабатывающих предприятий будет в значительной мере зависеть от полноты освоения отходов, наносящих ущерб окружающей среде, но в то же время пригодных для использования в качестве минерального сырья.

Месторождение находится вне экологических зон Байкальской природной территории. Согласно Федеральному закону РФ «Об охране озера Байкал» (с изменениями на 22.08.2004 г.) на этой территории выделяются следующие экологические зоны:

• центральная – непосредственно оз. Байкал и прилегающие к нему территории;

• буферная – территория, включающая в себя водосборную площадь оз. Байкал в пределах РФ;

• зона атмосферного влияния – территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от оз. Байкал, действующие хозяйственные объекты на которой оказывают негативное влияние на экологическую систему оз. Байкал.

Озерное месторождение находится на востоке от оз. Байкал далеко (350 км) за пределами 200-километровой зоны.

Основная, протекающая в 1,5-2,0 км от месторождения р.Заза является притоком, находящейся в 30 км к северу от будущего карьера самой крупной в районе р.Витим, которая, в свою очередь, впадает в р.Лена, текущую на север в море Лаптевых.

Таким образом, установленные для Байкальской природной территории требования к особому режиму охраны экологической системы не применяются к бассейну Озерного месторождения.

В настоящее время научная школа «Открытая разработка месторождений полезных ископаемых» представлена двумя докторами наук, двумя доцентами и двумя ассистентами кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, а также 12 аспирантами и 35 кандидатами технических наук, работающих в Санкт-Петербурге.

Перспективными направлениями деятельности научной школы является продолжение исследований в области образования и способов разработки техногенных месторождений, к которым относятся склады горных пород – отходов карьера, а также многолетние хвостохранилища, образованные после обогащения руд черных и цветных металлов; малоотходных технологий открытой разработки и теории проектирования основных параметров карьеров, разрабатывающих однородные и комплексные месторождения; риска принимаемых решений и надежности работы системы «карьер». На ближайшие три года запланирована защита двух докторских диссертаций.