

## ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 622.014.3-62-519

### СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ ОЛИМПИАДИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Г. В. Калабин, Т. И. Моисеенко\*, В. И. Горный\*\*,  
С. Г. Крицук\*\*, А. В. Соромотин\*\*\***

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: kalabin.g@gmail.com,  
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

*\*Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН,  
E-mail: geokhi.ras@relcom.ru, ул. Косыгина, 19, 119991, г. Москва, Россия*

*\*\*Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН,  
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru, ул. Корпусная, 18, 197110, г. Санкт-Петербург, Россия*

*\*\*\*Научно-исследовательский институт экологии и рационального использования  
природных ресурсов, E-mail: ecoins@tmn.ru, ул. Пржевальского, 37, 625003, г. Тюмень, Россия*

Обосновывается актуальность использования цифровых космических материалов на региональном и локальном уровне для оперативной оценки состояния природной среды в зонах деятельности предприятий горнопромышленного комплекса. Приводятся и анализируются результаты исследований состояния природной среды на примере территории размещения горнодобывающего предприятия, обрабатывающего открытым способом Олимпиадинское золоторудное месторождение (Красноярский край).

*Предприятия горнопромышленного комплекса, ресурсопотребление, оценка состояния природной среды, техногенная нагрузка, спутниковый мониторинг, нормализованный дифференцированный вегетационный индекс (НДВИ)*

#### ВВЕДЕНИЕ

В основе существования и развития общества лежит постоянно возрастающее использование природных ресурсов, основными из которых являются минерально-сырьевые. Добыча полезных ископаемых относится к отраслям ресурсопотребления, что традиционно связано с изъятием из природы первичного сырья и энергии с образованием большой массы отходов. Безвозвратное изъятие из природы первичного сырья не может быть экологически чистым, в отличие от отраслей ресурсопользования, например леса, в которых изъятие древесины из природы сочетается с его воспроизводством на основе использования природных процессов и их стимулирования. Воздействие горного производства на окружающую среду носит многофакторный характер, существенно видоизменяя верхнюю часть литосферы, гидросферу, атмосфе-

ру, а также почвенный покров и естественную биоту. Техногенное нарушение верхней части литосферы абсолютно неизбежно, так как только таким путем достигается главная цель — добыча минерального сырья. При этом отвалы горных пород будут храниться в природных (био-генных) ландшафтах неопределенное время, что приводит к развитию активных процессов миграции химических элементов и стокам растворенных веществ.

Защита естественной биоты Земли от последствий техногенного изменения ее недр и составляет содержание понятия экологической безопасности освоения недр. Первоочередное значение имеет проблема создания методологии оценки экологической опасности факторов техногенного воздействия (а значит, и степени экологической безопасности применяемой предприятием технологии) не по величине воздействия, а по интегральной реакции биологической системы, воспринимающей воздействие. В соответствии с этой концепцией необходимо исследование взаимодействия технологических и природных систем.

Цель данной работы — развитие метода количественной оценки состояния окружающей среды территории размещения предприятия по открытой разработке золоторудного месторождения и сравнение его с экспертными оценками, выполненными ранее [1].

При разработке месторождений открытым способом производственные процессы, в отличие от подземного [1], происходят в горных выработках незамкнутого контура, открытых в атмосферу. Осуществляются они с полным разрушением биоты, изъятием почвенного покрова и горных пород. В результате масштабного нарушения гидрогеологического режима и образования депрессионных воронок истощаются запасы подземных вод, загрязняются поверхностные водоемы за счет сброса карьерных вод. Кроме того, образуются и выделяются в атмосферу большие объемы пыли и токсичных газов. В природных ландшафтах формируются объемные отвалы твердых отходов, преобразующие орографию местности. В процессе эксплуатации площадь нарушенных территорий прирастает за счет механического воздействия при увеличении размеров карьера, а также диффузионных и осмотических процессов в грунтах.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Характеристика объекта исследований.** В качестве объекта оценки выбрана территория, окружающая Олимпиадинское золоторудное месторождение в Северо-Енисейском районе Красноярского края. С 1983 г. месторождение отрабатывается карьером “Восточный”. В настоящее время его глубина составляет 420 м, диаметр 1600 м. Горные работы на карьере “Западный” ведутся с 2004 г. По состоянию на 2011 г. его глубина составляет 75 м при длине 1100 м и ширине 150 м. В 9 км к северо-западу от Олимпиадинского ГОКа расположено золоторудное месторождение “Титимухта”, которое с 2007 г. также отрабатывается открытым способом. В 2010 г. здесь добыто 2345 тыс. т руды. Близость его к Олимпиадинскому ГОКу позволяет использовать освобождающиеся мощности последнего для переработке руды карьера “Титимухта” [2, 3].

Технологическая схема разработки месторождения карьерным способом основана на применении мощных экскаваторно-автомобильных комплексов и буровзрывных работ. Массовые взрывы зарядами общим весом 15–20 т проводятся еженедельно. Искусственное проветривание не используется. Транспортировка руды и горной массы осуществляется карьерными автосамосвалами грузоподъемностью 40–136 т [4]. Переработка сульфидной руды Олимпиадинского месторождения производится на двух золотоизвлекающих фабриках — ЗИФ-2 и ЗИФ-3, месторождения “Титимухта” — на ЗИФ-1. При обогащении золотосодержащей руды используется гравитационно-флотационная технология с последующим биоокислением флотоконцентрата и сорбционным выщелачиванием биокеков. Хвосты флотации складированы в хвостохранилищах. В них сбрасываются также карьерные и ливневые воды в объеме не более

1 тыс. м<sup>3</sup>/ч, которые проходят предварительную очистку и хранятся в накопительном пруду. Водоприток подземных вод в карьер “Восточный” невелик и составляет 335 м<sup>3</sup>/ч, в карьер “Западный” — 61 м<sup>3</sup>/ч [4].

Производственная деятельность предприятий, сконцентрированных на ограниченной территории в радиусе 8 км, оказывает негативное воздействие на окружающую среду. В первую очередь это связано с механическим разрушением почвенного и растительного покровов при строительстве инфраструктуры предприятий и развитии горных работ на карьерах. Во-вторых, с размещением на поверхности как значительных объемов вскрышных пород (около 10 тыс. т на 1 т золота), так и хвостов обогащения. Практически это неопасные отходы (нетоксичные и слаботоксичные IV и V класса опасности). Более токсичные вещества I–III класса опасности (ртутьсодержащие отходы, отработанные технические масла и прочие нефтепродукты) вывозятся и утилизируются сторонними специализированными организациями [5].

В качестве положительного фактора следует отметить, что наиболее опасное по экологическим требованиям химическое производство — аффинаж золота — осуществляется за пределами промлощадки, на заводе цветных металлов в Красноярске. Работа на предприятиях организована по вахтовому способу. Вахтовый поселок обеспечивает постоянное проживание 6 тыс. чел. В 2010 г. на Олимпиадинском ГОКе внедрена система управления экологическими рисками в соответствии с требованиями международного стандарта ISO-14001:2004 [5].

Почвенный покров района размещения ГОКа имеет мозаичный вид и включает буротаежные, подзольные иллювиально-гумусовые и дерново-карбонатные почвы. Они слабо подвергаются эрозии, отличаются большим потенциалом самоочищения от минеральных загрязняющих веществ и характеризуются достаточно высокой эмиссией CO<sub>2</sub> — от 900 до 1500 кг/га/вегетационный период. Лесистость территории высокая и составляет более 67–81 % с преобладанием хвойных видов. Годичная продукция фитомассы 8–11 т/га [6]. Все перечисленные природные факторы позволяют предварительно оценивать экологическую ситуацию района размещения ГОКа как благоприятную.

**Методика исследований.** Применительно к изучаемой территории анализировались цифровые карты нормализованного дифференциального вегетационного индекса (НДВИ), представляющие собой стандартный продукт (уровень L3) в виде 16-дневного цифрового композита с геометрическим разрешением на местности более 250 м. Карты подготовлены по материалам съемок спутниками Terra (MODIS)/Aqua(MODIS) [7]. Эти карты подобраны за каждый 16-дневный цикл, в периоды с 1 мая по 30 сентября, на каждый год в течение 2000–2011 гг. Всего подобрано 110 карт НДВИ. В качестве картографической основы приняты: цифровая карта России 1:1 000 000 (USGS); цифровая модель рельефа (проект радарной топографической съемки поверхности Земли — SRTM) [8]. Для анализа закономерностей пространственно-временных вариаций НДВИ использовалась цифровая карта растительного покрова России с разрешением 250 м, составленная ИКИ РАН по спутниковым и наземным данным [9]. Количественная оценка состояния окружающей среды на территории размещения предприятия по спутниковым материалам проводилась по разработанной ранее методике [10].

На первом этапе в пределах исследуемого региона, вокруг источника техногенной нагрузки, выделялись кольцевые концентрические зоны (рис. 1), ограниченные окружностями с диаметрами: первая (внутренняя) зона — от 0 до 6.5 км; вторая — 7.8 км; третья — 8.15 км; четвертая зона — 9.3 км. Ширина кольцевых зон увеличивается от центра к периферии. Это сделано для того, чтобы более детально охарактеризовать изменчивость НДВИ в области его наибольших градиентов, которые расположены вблизи источника техногенной нагрузки. Водные объекты маскировались, чтобы минимизировать их влияние на результат. Затем в кольцевых

концентрических зонах в соответствии с картой растительного покрова выделялись области лесов. Внутри этих областей рассчитывались средние значения НДВИ для каждой концентрической кольцевой зоны. Учитывая большое количество пикселей (измерений), попадающих в каждую кольцевую зону, средние значения НДВИ рассчитывались с чрезвычайно малыми случайными погрешностями. Поэтому на результирующих графиках в силу их малости не показаны доверительные интервалы.

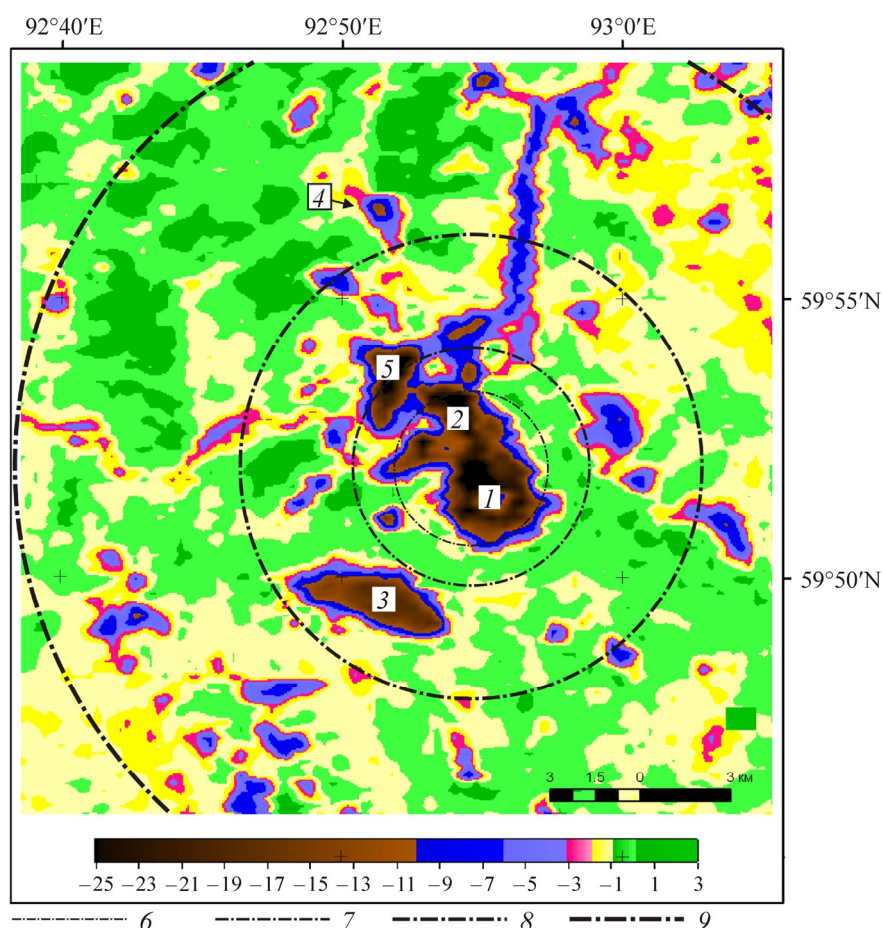


Рис. 1. Фрагмент карты летнего НДВИ Олимпиадинского ГОКа. Цветная шкала представлена в стандартных отклонениях, вычисленных для НДВИ лесов внешней (ненарушенной) кольцевой зоны, ограниченной окружностями диаметром 60 и 120 км. 1 — карьер “Восточный”; 2 — карьер “Западный”; 3 — голец “Енашимский Полкан”; 4 — золоторудное месторождение “Титимухта”. 5 — хвостохранилище. Внешние границы кольцевых зон (6–9), в пределах которых изучалось влияние Олимпиадинского ГОКа на окружающие экосистемы, имели диаметр 6.5; 7.8; 8.15 и 9.30 км. Границы 60 и 120 км расположены за пределами данного фрагмента карты

Леса внешней (ненарушенной, фоновой) кольцевой зоны, ограниченной окружностями диаметрами 60–120 км, характеризуются малыми дисперсиями НДВИ. Для лесов этой зоны рассчитаны стандартные отклонения НДВИ, которые использовались в качестве количественной меры для выделения нарушенных под действием природных факторов и техногенной нагрузки экосистем. Формально снижения значений НДВИ от среднефоновых на 3 стандартных отклонения считались значимыми для выявления нарушенных экосистем. Территории, расположенные вблизи Олимпиадинского ГОКа, характеризовались значительным (аномальным) понижением НДВИ, достигающим 25 среднеквадратичных отклонений фона (см. рис. 1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Низкими значениями НДВИ характеризуется внутренняя зона (диаметром 5 км), где расположен ГОК (рис. 1, 2). Затем, на расстоянии 10–12 км от источника техногенного воздействия окружающей среды, значения НДВИ стабилизируются.

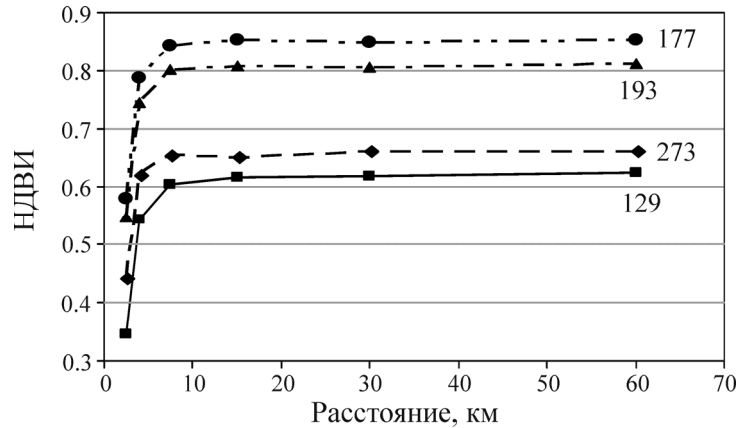


Рис. 2. Изменчивость НДВИ с ростом расстояния от ГОКа (2011 г.). Цифрами указано число дней с начала года, начиная с которых были подготовлены 16-дневные композиты НДВИ

Пространственно-временные вариации НДВИ зоны влияния предприятия на окружающие экосистемы (внутренняя зона с нарушенными экосистемами) представлены на рис. 3 и 4.

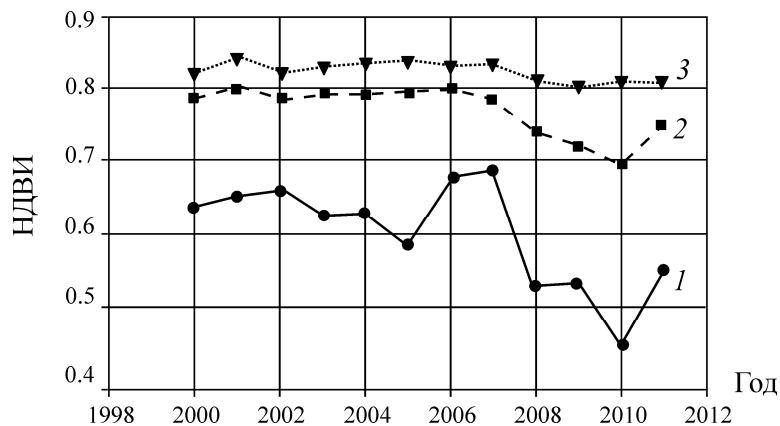


Рис. 3. Многолетние изменения понижений значений НДВИ в июле, рассчитанные в пределах кольцевых зон диаметрами: 0–5 км (1); 5–8 км (2); 15–30 км (3)

На рис. 3 отчетливо прослеживается закономерное за последние 10 лет значительное снижение среднего значения НДВИ в пределах внутренней зоны 2.5 км. Для зон 5–8 и 15–30 км также наблюдается некоторое синхронное снижение НДВИ в период между 2007 и 2011 гг., что может быть связано с развитием горных работ на карьерах “Западный” и “Титимухта”, а также геологоразведочных работ на новых участках.

Динамика НДВИ указывает на увеличение площади нарушенных территорий в импактной зоне, ограниченной окружностями диаметром от 5 до 8 км, которая включает производственную инфраструктуру Олимпиадинского ГОКа. Пороговый уровень НДВИ = 0.3 для построения графика на рис. 4 выбран таким образом, чтобы исключить из рассмотрения природные объекты, лишенные растительности — гольцы (в том числе “Енашимский Полкан”, см. 3 на рис. 1).

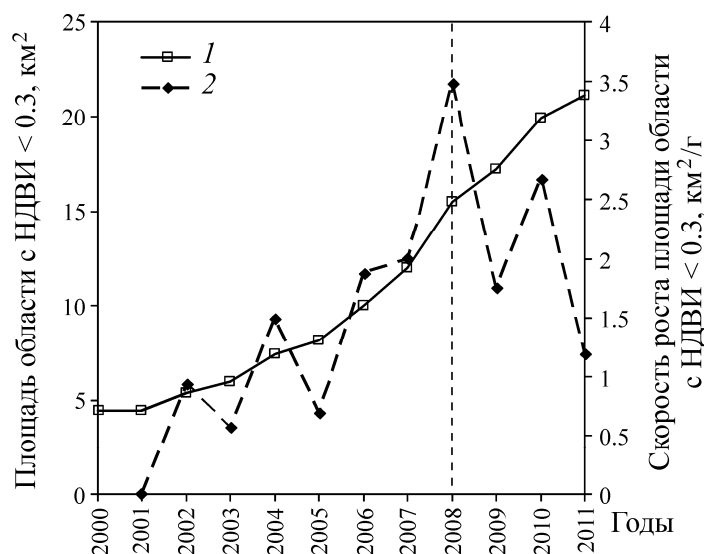


Рис. 4. Динамика площади НДВИ, соответствующей нарушенным территориям: 1 — площадь области с НДВИ менее 0.3; 2 — скорость роста области с НДВИ менее 0.3

Рост площади нарушенных лесных экосистем в период с 2000 по 2011 г. происходил неравномерно. Максимум скорости роста нарушенной площади отмечен в 2008 г. (см. рис. 4).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Негативное влияние карьера на состояние растительности определяют три фактора: развитие горных работ и, как следствие, рост площади нарушенных территорий (геомеханическое воздействие на растительный и почвенный покров), массовые взрывы и выхлопные газы (химическое загрязнение атмосферы) при транспортировке руды и вскрышных пород мощными автосамосвалами. Кроме того, формировалась и развивалась депрессионная воронка, что может привести к нарушению гидрогеологического режима подземных вод. Однако последний фактор существенного влияния на состояние лесов за пределами промплощадки не оказывает, поскольку, как отмечено выше, водоприток в карьер незначителен. Об этом свидетельствует ненарушенная лесистость на некоторых участках по бортам карьера (1 на рис. 5), где заканчивается геомеханическое нарушение поверхности и территория не занята отвалами горных пород и хвостохранилищами.

По мере углубления карьеров фактор выбросов газов при массовых взрывах уменьшается, и при определенной глубине (более 300 м) и отсутствии принудительной вентиляции пылегазовый факел может оставаться в пределах атмосферы карьера.

Анализ динамики площади экосистем, на которые Олимпиадинский ГОК за последние 11 лет оказал существенное воздействие (рис. 4), показывает, что зона влияния горнодобывающего комплекса увеличилась с 4.9 км<sup>2</sup> в 2000 г. до 20 км<sup>2</sup> в 2010 г. Это обусловлено прежде всего увеличением производительности Восточного карьера с соответствующим увеличением глубины горных работ и интенсивным разносом бортов карьера. Так, в период с 2000 по 2005 г., среднегодовой прирост площади карьера составлял 0.52 км<sup>2</sup>. В период 2005–2010 гг. этот показатель увеличился почти в 5 раз (2.5 км<sup>2</sup>). В 2008 г. отмечается максимальный прирост нарушенных земель (2 на рис. 4), который, скорее всего, вызван дополнительной нагрузкой на природную среду, вызванной вводом в эксплуатацию соседнего месторождения “Титимухта”.



Рис. 5. Карьер “Восточный” по состоянию на 2010 г. На борту карьера ненарушенный лесной массив отмечен цифрой 1

Суммирующий эффект снижения биомассы и, как следствие, увеличения площади нарушенных земель со значением НДВИ  $< 0.3$  на исследуемой территории ( кривые 1 и 2 на рис. 3) включает рост техногенной нагрузки за счет воздействия введенного в эксплуатацию в 2004 г. карьера “Западный” при некотором снижении производительности карьера “Восточный” (с 10.7 млн т руды в 2009 г. до 9.5 млн т руды в 2010 г. [5]). За этот период средние значения НДВИ снизились на 0.1 на территории диаметром 5 км и на 0.06 на территории диаметром 8 км (см. рис. 3). Последнее можно объяснить подготовкой и запуском в эксплуатацию карьера месторождения “Титимухта” (рис. 1, 4). Кроме того, возможно, что для территорий всех кольцевых зон, начиная с 2007 г., некоторый вклад в снижение НДВИ в исследуемом районе вносят также многолетние климатические изменения.

Для сравнительной оценки горнодобывающих предприятий в таблице приведено ранжирование возможных комбинаций горно-обоганительных комплексов по степени относительного экологического риска.

Экспертная оценка открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых по степени относительного экологического риска [1]

Инфраструктура предприятия	Степень экологического риска в зависимости от следующих факторов (от 0 до 1)						
	Объем добываемой горной массы			Токсичность исходного сырья		Экологичность транспорта	
	малый	средний	большой	нет	да	да	нет
1. Карьер с бестранспортной системой разработки	—	0.2	—	0.2	0.25	—	—
2. Карьер с транспортной системой разработки	—	0.25	0.3	0.2	0.3	0.25	0.3
3. Карьер, внешние отвалы горных пород, обоганительная фабрика, хвостохранилище	—	0.35	0.4	0.4	0.45	0.4	0.45
4. Карьер, отвалы горных пород, обоганительная фабрика, хвостохранилище, населенный пункт	—	0.45	0.5	0.45	0.5	0.5	0.55

Согласно данным таблицы, качественная оценка состояния окружающей среды исследуемого ГОКа соответствует позиции 3, включающей карьер, внешние отвалы вскрышных пород, обогатительную фабрику, хвостохранилище. При такой производственной инфраструктуре негативное влияние предприятия на состояние окружающей среды оценивается как допустимое с приемлемым экологическим риском, равным 0.45. Исходя из данных, представленных на рис. 3, значение НДВИ для импактной зоны, ограниченной окружностями диаметром 5–8 км, за период 2007–2011 гг. оценивается в пределах 0.61–0.65. Таким образом, можно сделать вывод, что территория размещения Олимпиадинского ГОКа содержит достаточную ассимиляционную емкость для нейтрализации техногенной нагрузки (газовые и пылевые выбросы в атмосферу) за пределами прямого геомеханического воздействия на естественные экосистемы.

### ВЫВОДЫ

1. Территория размещения Олимпиадинского ГОКа имеет высокий природный потенциал и способна восстановить растительный покров при условии ликвидации механически нарушенных земель. Основной техногенной нагрузкой на окружающую среду территории размещения карьеров является механическое разрушение почвенного покрова и растительности, которое постоянно возрастает по мере отработки месторождения. Это связано со спецификой геотехнологии, предусматривающей динамичное развитие и углубление горных работ в карьере с одновременным увеличением площади отвалов горных пород и хвостохранилищ.

2. Техногенная нагрузка, связанная с химическим загрязнением атмосферы, наоборот, уменьшается с ростом глубины карьера, что объясняется отсутствием искусственного проветривания карьеров. В данном случае при определенной глубине карьеров газообразные вещества подавляются и оседают в пределах его пространства.

3. Разработанный ранее метод качественной (экспертной) оценки состояния окружающей среды можно использовать на предварительном этапе проектирования без проведения сложных и достаточно трудоемких инженерно-экологических изысканий [10]. Доказательство основывается на количественной оценке окружающей среды Олимпиадинского ГОКа с помощью космических материалов и определения НДВИ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Калабин Г. В.** Типизация генеральных планов карьеров и оценка степени их экологичности // Маркшейдерия и недропользование. — 2012. — № 3.
2. **Олимпиадинское месторождение.** <http://mestor.geoinfocom.ru/publ/1-1-0-36>
3. **Золотодобывающая компания “Полюс”.** <http://www.yarsk.ru/dosie>
4. **Проект разработки Олимпиадинского золоторудного месторождения.** <http://www.bestreferat.ru/referat.html>
5. **Полюс.** Годовой отчет за 2010 год. <http://www.polyusgold.ru/reportes>
6. **Природные ресурсы и экология России.** Федеральный атлас. — М., 2002.
7. <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>
8. <http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>.
9. <http://terranorte.iki.rssi.ru/onlinegis/html/viewer.php?q=1>
10. **Калабин Г. В.** Методология количественной оценки состояния окружающей среды на территориях размещения предприятий по освоению георесурсов // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.

*Поступила в редакцию 19/XII 2012*