

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 622.014.3-62-519

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ РЕАКЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ОСВОЕНИЮ СОРСКОГО МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Г. В. Калабин¹, В. И. Горный², С. Г. Крицук²

¹*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: kalabin.g@gmail.com,
Крюковский тупик, 4, 11102, г. Москва, Россия*

²*Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, E-mail: v.i.gornyy@mail.ru,
ул. Корпусная, 18, 197110, г. Санкт-Петербург, Россия*

Обосновывается актуальность использования цифровых космических материалов на региональном и локальном уровне для оперативной количественной 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 Сорское молибденовое месторождение (Республика Хакасия, Россия).

Горнопромышленный комплекс, техногенная нагрузка, растительность, спутник, вегетационный индекс, реакция

Воздействие горного производства на окружающую среду существенно видоизменяет литосферу, гидросферу, атмосферу, а также почвенный покров и естественную биоту. Техногенное нарушение литосферы абсолютно неизбежно, так как только таким путем достигается главная цель — добыча минерального сырья.

В отличие от подземного способа разработки месторождений [1], при разработке открытым способом производственные процессы 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 громадные отвалы твердых отходов, изменяющие орографию местности. В процессе эксплуатации площадь нарушенных территорий прирастает за счет механического воздействия при увеличении размеров карьера, а также диффузионных и инерционных процессов. Для многих предприятий площадь воздействия на природную среду достигает десятков тысяч и более

квадратных километров, а время воздействия составляет десятки и сотни лет. В связи с этим возникают трудности в корректной количественной оценке влияния предприятий на природную среду. В то же время, с момента появления в космической отрасли измерительных, метрологически обеспеченных технических средств дистанционного зондирования прошло уже более 30 лет. В результате в архивах накоплены продолжительные временные ряды спутниковых изображений, позволяющих анализировать состояние природной среды на значительных площадях и с достаточной детальностью. Цель настоящей статьи — изложение методического подхода к применению космических материалов при мониторинге реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению недр и демонстрация их эффективности при решении конкретной практической задачи.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика месторождения. В качестве объекта выбрана территория, окружающая Сорское месторождение медно-молибденовых руд, которое обрабатывается с 1950 г. Руды в основном прожилково-вкрапленные (более 80%). Главные рудные минералы: молибденит, пирит, халькопирит; основной жильный минерал кварц. Токсичность руд в целом и соединений молибдена в частности относительно невысокая [2].

В 1955 г. была запущена первая очередь обогатительной фабрики, которая к 1989 г. достигла производительности ~9 млн т/год. В начале 2006 г. сдана в эксплуатацию первая очередь ООО “Сорский ферромолибденовый завод” (ФМЗ) мощностью 4500 тыс. т/год, вторая — в конце 2006 г. Основная продукция горно-металлургического комплекса (ГМК): молибденовый и медный концентраты, ферромолибден, нерудные строительные материалы.

Природные условия. Местность характеризуется горными образованиями средней высоты (от 620 до 1200 м), перемежающимися широкими равнинами и короткими ущельями. Месторождение расположено на высоте 850–880 м над ур. м. (г. Сорск на высоте 720–780 м) на границе степной, лесостепной и горно-таежной зон. Зоны различаются как по количеству осадков, так и по радиационному и температурному режиму. Климат резко континентальный с холодными и малоснежными зимами, теплой весной, жарким летом и продолжительной осенью. Среднегодовая температура составляет -5°C , абсолютный минимум -48°C , максимум $+35^{\circ}\text{C}$ [3]. Окружающие территорию горы являются естественным барьером от холодных воздушных потоков и создают свой микроклимат. Почвенный покров района размещения ГМК имеет мозаичный вид и включает горные серые лесные почвы и обеззоленные черноземы. Эти почвы характеризуются нижними значениями среднего диапазона потенциала самоочищения от минеральных загрязняющих веществ 11–14 баллов [4] и способны активно накапливать загрязняющие вещества [5]. Лесистость территории небольшая с преобладанием березы, осины и лиственницы. Природные условия и техногенные факторы на территории размещения предприятий, приведенные в таблице, позволяют предварительно оценить потенциал самовосстановления растительного покрова после снятия техногенной нагрузки восстановления как условно благоприятный.

Горно-геологические и технологические условия, техногенные факторы. Месторождение обрабатывается открытым способом с внешним отвалообразованием. Размеры карьера по состоянию на 2012 г.: длина 2.5 км, ширина 2.0 км, глубина 500 м (рис. 1). Вывозка руды и породы осуществляется автомобильным транспортом. Извлечение руды при добыче составляет около 96%. Водоотлив небольшой — 500–800 тыс. м³/ч. Диаметр депрессионной воронки в среднем 3.2 км.

Характеристика природных условий территории размещения Сорского ГМК и техногенных факторов, определяющих состояние ландшафтов и растительного покрова в процессе освоения медно-молибденового месторождения

Природные условия			Технологические, техногенные и антропогенные факторы		
Рельеф	Горный 620 – 1200	+	Производственная инфраструктура	Многоотраслевая (добыча, обогащение, металлургия)	–
Физико-географические зоны	Граница степной, лесостепной и горно-таежной зон	+	Объем производства, млн т/год	Крупное, 9.0	–
Осадки, мм/год	400 – 850	– +	Срок эксплуатации, лет	Карьер, 62, обогатительная фабрика, 57, металлургический завод, 6	–
Среднегодовая температура, °С	– 5	+	Токсичность первичного сырья и отходов	3 – 4 степень	+
Потенциал загрязнения атмосферы	Повышенный, 2.7 – 3.85		Отходы горных пород, млн т/год	1.2	–
Почвенный покров	Горные серые лесные, чернозем	+	Отходы обогащения, тыс. т/год	Нет данных	–
Потенциал самоочищения почв, балл	Ниже среднего, 11 – 14	–	Отходы металлургии, т/год	Нет данных	–
Удельная эмиссия почв С-СО ₂ , кг/га/вегетационный период	Средняя, 1500 – 2000	+	Суммарные выбросы в атмосферу, тыс. т/год	Небольшие, 6.0	+
Лесистость, %	Средняя, 31 – 40	+	Сбросы карьерных вод (водоотлив), тыс. м ³ /ч	Небольшие, 500 – 800	+
Годичная фитомасса, т/га	Высокая, 16	+	Населенный пункт	Небольшой, 13 000 чел.	– +

Примечание. “+” — положительный фактор, обеспечивающий устойчивость природного потенциала; “–” — отрицательный фактор, влияющий на уменьшение природного потенциала.



Рис. 1. Общий вид Сорского карьера (отсутствие лесов по внешним бортам карьера)

Обогатительная фабрика, использующая технологию коллективной и селективной флотации, работает на оборотном водоснабжении. Извлечение молибдена при обогащении 89.1 %, меди — 53 %. Однако в связи с низкими концентрациями полезных компонентов в руде (молибден

0.04 %, медь 0.033) образуется большое количество отходов горных пород (около 1200 тыс. т/год), которые существенно изменяют природные ландшафты. Отходы обогатительной фабрики направляются в хвостохранилище. В хвостах обогатительной фабрики отмечаются повышенные концентрации, г/т: Cu (150–200), Mo (200), Yb (3), Ag (0.3) [6]. При порывистых ветрах и низкой влажности происходит разнос пылевых частиц с сухой части хвостохранилища. Исследования почв показали, что основными металлами в них являются Fe, Mn, Mg, Si и Al, т. е. отсутствуют тяжелые металлы, содержащиеся в хвостах. Кроме того, по результатам изучения в пробах снега атмосферных пылевых выпадений выявлены: ортоклаз $K[AlSi_3O_8]$, кварц SiO_2 , биотит $K(Mg,Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH, F]_2$, биогенные частицы. Следовательно, техногенные образования не являются главным источником загрязнения почв экотоксикантами [7]. Предприятиями по добыче и обогащению руды ежегодно в окружающую среду выбрасывается 3 844 т загрязняющих веществ [8].

На Сорском ФМЗ отходящие от печей газы на 90 % очищаются от пыли в циклонах, а от концентрации SO_2 — в скрубберах. Система оборотного водоснабжения полностью замкнута. Ежегодные выбросы в атмосферу относительно небольшие (2 210 т) при отсутствии токсичных веществ в активной форме. Пыль, содержащая молибден и растворимые в воде соединения молибдена (триоксид молибдена и молибдаты), имеет незначительную токсичность и при попадании в организм человека не вызывают серьезных последствий для здоровья, поскольку доза для поражения должна быть более 15 мг/день [9]. Имеется вероятность накопления молибдена в организмах работающих в карьере, на обогатительной фабрике и особенно на ФМЗ. Однако официальных сведений о таких поражениях пока не было.

Производственная деятельность Сорского ГМК, сконцентрированная на ограниченной территории диаметром 6.5 км, оказывает следующие негативные воздействия на окружающую среду: механическое разрушение почвенного и растительного покрова при строительстве инфраструктуры предприятий и развитии горных работ на карьерах; размещение на поверхности огромных объемов вскрышных пород и хвостов обогащения (IV и V класс опасности) и выброс загрязняющих веществ в атмосферу, превышающий 6 000 т/год. Кроме того, в непосредственной близости от промплощадки расположен г. Сорск с населением 13 тыс. чел. Теплоснабжение города осуществляется ТЭЦ ООО «Сорский ГОК» и тремя коммунальными котельными, работающими на угле. Поэтому в пробах снега и в почве обнаружены техногенные частицы угля и шлака. Таким образом, на территории кроме техногенного присутствует и антропогенный фактор негативного влияния на окружающую среду.

Перечисленные горно-геологические, технологические и техногенные факторы свидетельствуют о наличии определенного экологического риска.

МЕТОДИКА

Информационной основой для изучения влияния Сорского ГМК на окружающие экосистемы служили цифровые карты нормализованного дифференциального вегетационного индекса (НДВИ), представляющие собой стандартный распространяемый продукт (уровень L3) в виде 16-дневного цифрового композита с геометрическим разрешением на местности не лучше 250 м. Карты подготовлены по материалам съемок спутниками Terra (MODIS)/Aqua (MODIS) [10]. Эти карты включают каждый 16-дневный цикл за период с 1 мая по 30 сентября начиная с 2000 по 2011 г. Всего собрано 110 карт НДВИ (10 карт на вегетационный период за 11 лет). В качестве картографической основы приняты цифровая карта России 1:1 000 000 (USGS) и цифровая модель рельефа по данным спутника «Шаттл» SRTM [11]. 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 [12].

Количественная оценка состояния окружающей среды на территории размещения предприятия по спутниковым материалам проводилась по разработанной ранее методике [13]. На первом этапе вокруг источника техногенной нагрузки выделялись кольцевые концентрические зоны (рис. 2), ограниченные окружностями с диаметрами: первая (внутренняя зона) 0–5 км; вторая зона 5–8 км, третья 8–16.5 км, четвертая 16.5–26.5 км, пятая 26.5–62 км, шестая 62–96 км. Ширина кольцевых зон увеличивалась от центра к периферии. Это сделано для того, чтобы детально охарактеризовать НДСИ в области его наибольших градиентов, которые расположены вблизи источника техногенной нагрузки. Водные объекты маскировались для минимизации их влияния на результат. В кольцевых концентрических зонах в соответствии с картой растительного покрова выделялись области лесов и степей. Внутри этих областей рассчитывались средние значения НДСИ для каждой концентрической кольцевой зоны. В связи с тем что статистические выборки внутри каждой зоны составляли от тысяч до сотен тысяч реализаций (пикселей), средние значения НДСИ рассчитывались с высокой точностью, доверительные интервалы для этих значений НДСИ чрезвычайно малы (поэтому они не приводятся на результирующих графиках).

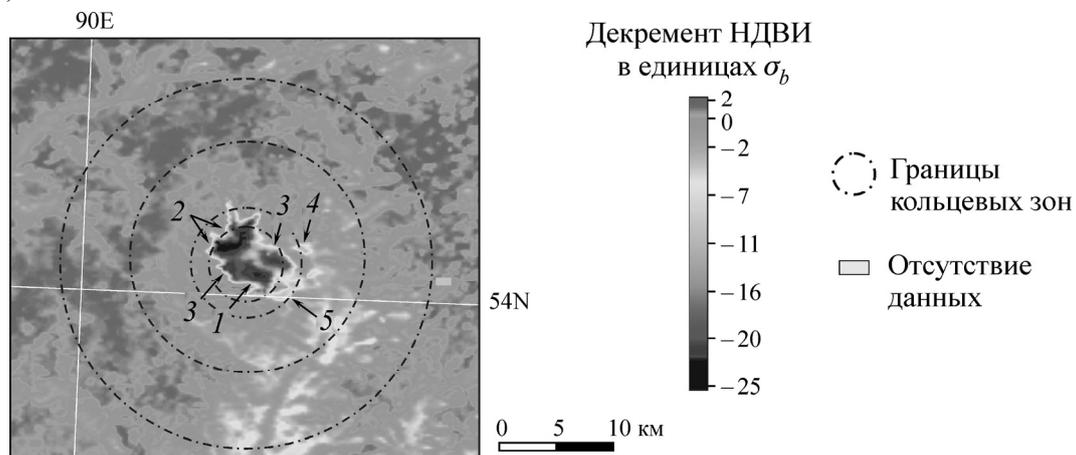


Рис. 2. Центральный фрагмент карты декремента НДСИ территории, на которой расположен Сорский ГМК. Стрелками обозначены: 1 — карьер; 2 — хвостохранилище; 3 — отвалы; 4 — оз. Теплое; 5 — г. Сорск

Для внешней (фоновой) зоны (62 и 96 км) рассчитывалось фоновое среднеквадратическое отклонение пространственных изменений НДСИ σ_b . Далее, в соответствии с основами теории передачи информационных сообщений, считалось, что пространственная изменчивость НДСИ в фоновой зоне является естественным “шумом” и отклонение среднего по зоне НДСИ на $2\sigma_b$ с вероятностью 0.954 указывает на значимую реакцию растительного покрова на внешнее воздействие, т. е. имеет место информационный сигнал о воздействии. На этой основе строилась карта декремента НДСИ (понижения НДСИ по отношению к фоновой зоне) в единицах σ_b . Такая карта позволяет количественно оценить достоверность выделения областей со значимыми изменениями растительного покрова, в том числе вызванными техногенным воздействием, т. е. выделять информационный сигнал о реакции растительного покрова на внешнее воздействие на фоне естественных помех.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что низкими значениями НДСИ характеризуется внутренняя зона (диаметр 6.5 км), где расположен Сорский ГМК (рис. 2, 3).

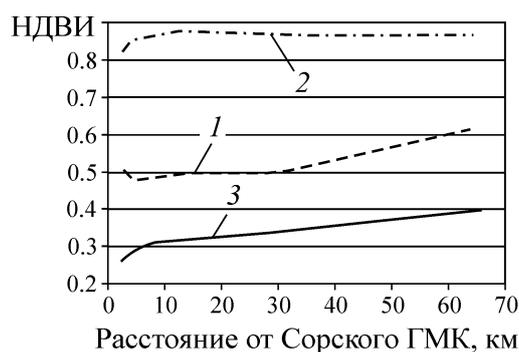


Рис. 3. Изменение средних значений НДВИ за период с 2000 по 2012 г. лиственных лесов с ростом расстояния от Сорского ГМК: 1 — первая половина мая 2007 г.; 2 — вторая половина июля 2007 г.; 3 — вторая половина сентября 2007 г.

С ростом расстояния от ГМК отмечается различное поведение НДВИ в различные сезоны года. Так, летом (2 на рис. 3) с увеличением расстояния от ГМК до 10–15 км НДВИ выходит на максимальное значение ~ 0.87 и далее практически не изменяется до удаления на 50–60 км. Весной и осенью (1 и 3 на рис. 3) картина изменения НДВИ по мере удаления от ГМК иная. Так же, как и летом, внутренняя зона характеризуется аномально низкими значениями НДВИ. Но по мере удаления от ГМК наблюдается плавное повышение НДВИ вплоть до расстояния в 60 км (см. рис. 3).

Анализ многолетних значений средних НДВИ лиственных лесов в районе Сорского ГМК показывает, что на протяжении последних 12 лет как в зоне непосредственно примыкающей к территории промплощадки (1 на рис. 4), так и в дальней зоне (2 на рис. 4) этот индекс изменялся весьма незначительно. Только в 2005–2006 гг. наблюдались малые по амплитуде колебания значений НДВИ во внутренней зоне (1 на рис. 4), хотя многолетний тренд НДВИ демонстрирует абсолютную стабильность ситуации.

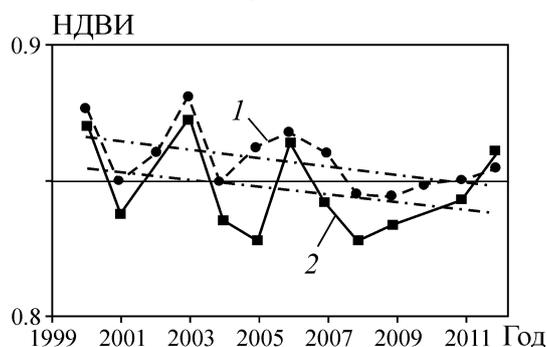


Рис. 4. Многолетняя динамика средних по зонам июльских НДВИ лиственных лесов в районе Сорского ГМК. Внешние кольцевые зоны ограничены окружностями диаметром, км: 1 — 62 и 96 (фон); 2 — 5–8; штрихпунктиром показаны многолетние тренды

В то же время анализ многолетних изменений площади с пониженными значениями НДВИ по отношению к фоновым (удаленным) территориям без разделения на типы экосистем (интегральные данные по лесным и степным экосистемам) показывает, что в ближней к промплощадке зоне отсутствуют какие-либо изменения (2 на рис. 5), а на удалении, в пределах второй и третьей кольцевых зон (1 на рис. 5), в 2010–2012 гг. наблюдалась аномально высокая скорость прироста площади (от 40 до 130 км², т. е. на 225%) с пониженными значениями НДВИ с декрементом $-6\sigma_b$ (3 на рис. 5).

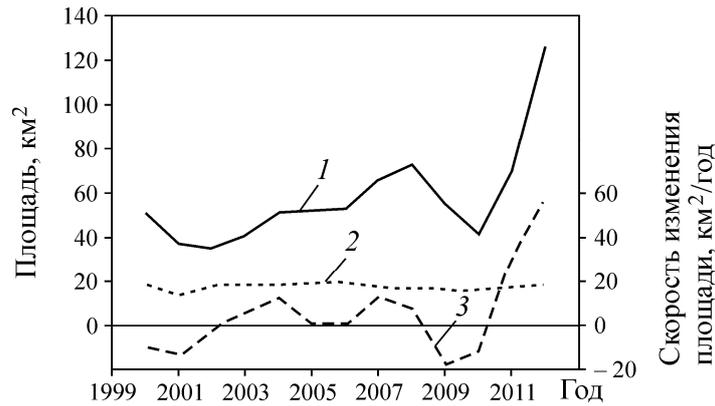


Рис. 5. Динамика площадей с пониженными значениями НДВИ в области, примыкающей к Сорскому ГМК: 1 — $6\sigma_b$; 2 — $12\sigma_b$; 3 — $-6\sigma_b$

Спецификой пространственно-временной изменчивости НДВИ в районе Сорского ГМК является поведение этого индекса в различные периоды вегетации при удалении от источника техногенного воздействия (см. рис. 3). Весной и осенью на расстоянии до 60 км наблюдается влияние комбината на экосистемы. В июле уже в ближней зоне НДВИ достигает своего максимума и сохраняет эти значения до удалений на 60 км от ГМК. Такая специфика пространственно-временных изменений НДВИ требует дальнейшего изучения причин, ее вызывающих.

Второй важный момент — высокая скорость приращения площадей с пониженными значениями НДВИ, наблюдавшаяся в 2010–2012 гг., когда измерения проводились без разделения на лесные и степные экосистемы (см. рис. 5). Дополнительный анализ показал, что этот рост произошел за счет степных экосистем, расположенных южнее г. Сорска в долине р. Бюря. В то же время в пределах лесных экосистем такого явления не наблюдалось (см. рис. 4). Последний период (2010–2012 гг.) в районе Сорского ГМК характеризуется снижением годового количества осадков (рис. 6). Можно предположить, что именно степные экосистемы отреагировали на это в первую очередь.

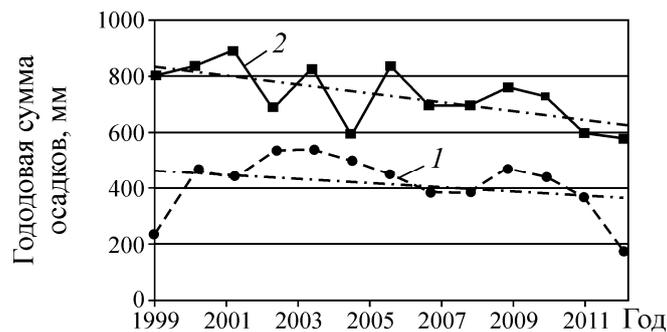


Рис. 6. Динамика выпадения осадков по данным двух метеостанций за 2000–2012 гг.: 1 — пос. Уйбат; 2 — пос. Коммунар; штрихпунктиром показаны многолетние тренды

Необходимо отметить, что в 2006 г. наблюдалось увеличение площади пониженного НДВИ в зоне, примыкающей к промплощадке (рис. 6). Возможно, это связано со строительством и вводом в строй двух очередей ФМЗ.

На рис. 7 кривая 1 характеризует многолетнюю динамику НДВИ территории размещения карьера, хвостохранилища и большей части отвалов горных пород, кривая 2 — новые отвалы и город, кривая 3 — фоновую область, на которую не распространяется воздействие Сорского

го ГМК. Таким образом, будем анализировать динамику НДВИ по совокупности двух кольцевых зон, ограниченных окружностями диаметром 0–5 км — импактная зона и 5–8 км — импактно-буферная зона. В импактной зоне в многолетнем плане НДВИ имеет незначительную отрицательную тенденцию -0.028 при абсолютном значении НДВИ 0.351 (2011 г.). Внутри импактно-буферной зоны (кривая 2 на рис. 7) НДВИ за 12 лет также незначительно снизился: с 0.79 в 2000 г. до 0.71 в 2011 г.

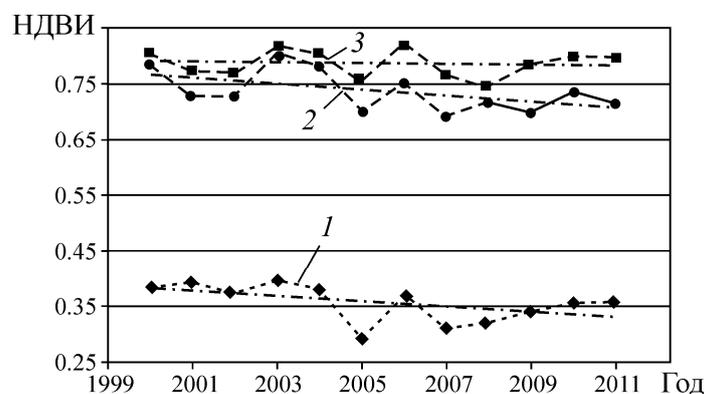


Рис. 7. Годовые вариации средних значений НДВИ в июле (193-й день года) за период с 1999 по 2011 г. для кольцевых зон, ограниченных окружностями диаметром, км: 1 — 0–5; 2 — 5–8; 3 — 62–96 (фон). Штрихпунктиром показаны многолетние тренды

Незначительные изменения среднего по импактной зоне НДВИ выражаются в значительном приращении области с декрементом НДВИ, равным $-6\sigma_b$, составившим почти 90 км^2 в период с 2010 по 2012 г. (см. рис. 5). Анализ изменения площади с декрементом НДВИ более $-6\sigma_b$ показывает, что после введения в 2006 г. в строй ФМЗ произошло небольшое расширение этой площади в 2007 и 2008 гг. В 2009 г. эта площадь даже несколько сократилась, однако в 2010–2012 гг. произошло ее резкое увеличение. В связи с этим может быть высказано две гипотезы. Первая — не исключено, что незначительный рост нарушенных площадей в 2007 и 2008 гг. произошел в результате механического нарушения растительного покрова при строительстве ФМЗ. Последующий рост нарушенных площадей — реакция растительности на химическое воздействие ферромолибденового производства. Если это действительно реакция растительности, то ее задержка во времени должна составлять приблизительно 4 года. Вторая гипотеза заключается в том, что задержка реакции растительности на 4 года после строительства ферромолибденового производства связана с износом оборудования и прежде всего циклонов и скрубберов, очищающих выбросы в атмосферу. Проверка гипотез требует дополнительных исследований.

Таким образом, за исследуемый период заметного ухудшения растительного покрова не отмечалось. Все события, связанные с резким уменьшением объема фитомассы, произошли ранее, когда формировался и развивался карьер, хвостохранилище, отвалы горных пород и строился город. Суммируя изложенное, следует принять среднее значение НДВИ для территории двух зон равным 0.56–0.58.

ВЫВОДЫ

Анализ горно-геологических, технологических и техногенных факторов свидетельствует о наличии умеренного экологического риска. Этот вывод подтверждается относительно высокими значениями средних для импактной и импактно-буферной зон НДВИ 0.56–0.58.

Основная техногенная нагрузка на окружающую среду обусловлена механическим разрушением почвенного покрова и растительности и их подтоплением при формировании хвостохранилища.

Техногенные образования не являются главным источником загрязнения почв экотоксикантами, поскольку в хвостах обогащения отсутствуют тяжелые металлы. Вместе с тем при порывистых ветрах и низкой влажности наблюдается разнос пылевых частиц с сухой части хвостохранилища.

Вокруг Сорского ГМК в 2010–2012 гг. отмечен аномальный рост площади (от 40 до 130 км², т. е. на 225 %) с пониженными значениями НДВИ с декрементом $-6\sigma_b$. Причина такого явления должна быть установлена дополнительными исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Калабин Г. В.** Типизация генеральных планов карьеров и оценка степени их экологичности // Маркшейдерия и недропользование. — 2012. — № 3.
2. **Покалов В. Т.** Геологические основы поисков и оценки эндогенных месторождений молибдена. — М.: Недра, 1983.
3. www.sorsk-adm.ru
4. **Природные ресурсы** и экология России. Федеральный атлас. — М.: НИИ “Природные ресурсы”, 2002.
5. **Глазовская М. А.** Проблемы и методы оценки эколого-геохимической устойчивости почв и почвенного покрова к техногенным воздействиям // Почвоведение. — 1999. — № 1.
6. **Азарова С. В.** Отходы горнодобывающих предприятий и комплексная оценка их опасности для окружающей среды (на примере объектов Республики Хакасия): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Томск, 2005.
7. **Капустина Ю., Бутенко А. В.** Техногенные образования в почве и пылеаэрозолях территории Сорского медно-молибденового месторождения: материалы XVII междунар. студ. конф. “Экология России и сопредельных территорий”. — Новосибирск, 2012. — Т. 1.
8. **Государственный доклад** “О состоянии окружающей среды республики Хакасия в 2010 году”. — Абакан, 2011.
9. **Малая горная энциклопедия** / под ред. С. Белецкого. — М.: Донбасс, 2004.
10. <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>
11. <http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>
12. <http://terrante.iki.rssi.ru/onlinegis/html/viewer.php?q=1>
13. **Калабин Г. В.** Методология количественной оценки состояния окружающей среды на территориях размещения предприятий по освоению георесурсов // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.

Поступила в редакцию 2/Х 2013