

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.271:351.77

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. В. Адушкин, С. П. Соловьев, А. А. Спивак, В. М. Хазинс

*Институт динамики геосфер им. акад. М. А. Садовского РАН,
E-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru; soloviev@idg.chph.ras.ru; spivak@idg.chph.ras.ru; khazins@idg.chph.ras.ru,
Ленинский проспект, 38, 119334, г. Москва, Россия*

Анализируются статистические данные о выбросах твердых микрочастиц в процессе добычи полезных ископаемых. Рассматриваются особенности выбросов микрочастиц в атмосферу при проведении крупномасштабных промышленных взрывов на карьерах. Представлены результаты газодинамических расчетов подъема пылегазового облака взрыва для определения локализации в тропосфере твердых микрочастиц и их концентрации. На примере Кузнецкого угольного бассейна показано влияние массовых взрывов на сейсмичность региона.

Микрочастицы в атмосфере, открытые горные работы, массовые промышленные взрывы, численное моделирование, сейсмичность

DOI: 10.15372/FTPRPI20200219

Биосфера Земли эволюционирует в естественной среде обитания, насыщенной минеральными микрочастицами, порожденными вулканической деятельностью, эрозией почв и горных пород, частицами морской соли и другими источниками. В индустриальный и постиндустриальный период развития общества наряду с природными источниками микрочастиц существенный вклад вносят источники техногенного происхождения, количество которых постоянно растет. Микрочастицы техногенного происхождения вследствие своего химического состава в большинстве случаев намного превосходят природный материал по негативному воздействию. Одним из источников интенсивного техногенного загрязнения среды обитания является минерально-сырьевой комплекс, который дает исходные материалы для производства более чем 70 % всей номенклатуры конечной продукции и обеспечивает почти 90 % энергетических потребностей современного общества [1].

Для использования в производственных целях из литосферы ежегодно добывается от сотни миллиардов до триллиона тонн твердого вещества [1, 2]. Значительная доля переработанной горной массы приходится на добычу полезных ископаемых открытым способом. Наиболее эффективным способом разрушения крепких горных пород в мировой практике остается энергия взрыва. Взрывная отбойка горной массы — основная технология при подготовке горных пород

к выемке. Современные исследования в области разработки новых технологий добычи полезных ископаемых показывают, что подобная ситуация сохранится и в ближайшие десятилетия [2, 3]. Значительные объемы горного производства определяют высокую значимость проблемы воздействия массовых промышленных взрывов на окружающую среду.

Постоянно ужесточающиеся требования к охране окружающей среды требуют детального анализа геоэкологических последствий как массовых промышленных взрывов, так и всех технологических процессов с целью совершенствования технологий и снижения негативного влияния горнодобывающего производства на среду обитания [4]. Наибольший интерес представляет изучение загрязнения атмосферы, связанное с пылевыведением при добыче и переработке горной массы, сейсмического воздействия массовых взрывов, которое определяет целостность промышленных и жилых объектов, а также подземных и наземных источников водоснабжения. Задача сохранения природной среды, здоровья людей, населяющих территории, примыкающие к горнодобывающим предприятиям, требует целенаправленного, комплексного изучения процессов, связанных с техногенным воздействием открытых горных работ на экосистему [5].

Еще одной важной экологической проблемой является влияние крупномасштабных массовых взрывов, применяемых на горнодобывающих предприятиях для вскрытия рудных тел и отбойки горной массы, на изменение сейсмического режима прилегающих территорий. Крупные взрывы, характеризующиеся большими объемами одновременно взрывающегося взрывчатого вещества, не только выступают в качестве триггера природных землетрясений, но также способствуют возникновению техногенно-наведенных землетрясений в ряде случаев катастрофического характера [6].

Цель настоящей работы — анализ статистических данных о выбросах твердых микрочастиц в процессе добычи полезных ископаемых и анализ основных геоэкологических последствий массовых промышленных взрывов химического взрывчатого вещества, осуществляемых на карьерах. Особенности технологии проведения крупномасштабных массовых промышленных взрывов рассмотрены на примере карьеров Лебединского и Михайловского ГОКов. Наряду с традиционно обсуждаемыми эмпирическими подходами к оценке параметров пылегазового облака взрыва, представлены результаты газодинамических расчетов подъема пылегазовых облаков взрыва, которые в дальнейшем будут использованы для определения локализации в тропосфере твердых микрочастиц, их концентрации и моделирования распространения микрочастиц в поле ветра.

СТАТИСТИКА ВЫБРОСОВ МИКРОЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Сведения о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу можно найти в ежегодных Государственных докладах “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации” Минприроды России. Основными загрязняющими веществами, поступающими в атмосферный воздух вместе с выбросами предприятий различных отраслей экономики, являются пыль, диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода. В докладах отдельно приводятся данные о выбросах загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников, о структуре выбросов по видам экономической деятельности. Так, мониторинг объема выбросов по видам экономической деятельности имеет следующие градации: 1 — обрабатывающие производства (например, в 2014 г. доля этих выбросов составляла 34.0 % от общего объема выбросов стационарных источников, в 2017 г. — 33.2%); 2 — добыча полезных ископаемых (в 2014 г. — 28.3 %. в 2017 г. — 28.1 %); 3 — обеспечение электрической энергией, газом и паром, кондиционирование воздуха (в 2017 г. — 20.3 %); 4 — сельское хозяйство, лесное хозяйство, охота, рыболовство; 5 — прочие виды выбросов [7].

Приведем анализ выбросов твердых частиц от стационарных источников всех видов экономической деятельности в целом и от добычи полезных ископаемых (табл. 1). По данным, включенным в Государственные доклады за период с 2000 по 2018 г., можно проследить динамику выбросов твердых частиц от стационарных источников. Видно, что на фоне непрерывно снижающейся полной массы выбросов твердых частиц доля выбросов предприятий по добыче полезных ископаемых достаточно стабильна и находится в пределах 16–19 %. Сокращение полной массы выбросов твердых частиц с 2000 г. приближается к двукратному. В [8] сокращение выбросов твердых частиц объясняется относительной простотой и меньшими затратами на проведение мероприятий по улавливанию, обезвреживанию и снижению их образования.

ТАБЛИЦА 1. Динамика выбросов твердых частиц в атмосферный воздух в период 2000–2018 гг.

Год	Выброс твердых частиц в атмосферный воздух, тыс. т		Доля выбросов предприятий по добыче полезных ископаемых от общего объема выбросов, %
	от стационарных источников	от предприятий по добыче полезных ископаемых	
2000	2972.2	—	—
2001	2973.2	—	—
2002	2882.8	—	—
2003	2870.0	—	—
2004	2860.0	—	—
2005	2800.0	500.0	17.80
2006	2840.0	470.1	16.60
2007	2743.4	453.6	16.50
2008	2704.2	431.8	16.00
2009	2341.0	399.5	17.06
2010	2283.1	392.8	16.50
2011	2283.1	—	—
2012	2249.4	—	—
2013	2008.5	375.3	18.70
2014	1922.2	—	—
2015	1820.4	329.6	18.10
2016	1723.9	—	—
2017	1728.9	—	—
2018	1509.0	—	—

МАССОВЫЕ ВЗРЫВЫ И ВЫБРОСЫ МИКРОЧАСТИЦ НА КАРЬЕРАХ

В настоящее время на карьерах добывают 80–93 % руд черных и цветных металлов, 70 % угля, практически 100 % строительных горных пород [9], при этом взрывная отбойка горной массы является основной технологией добычи минерального сырья. В [1] анализировалась полнота использования твердого вещества при добыче ряда полезных ископаемых (руды металлов, энергоносители, стройматериалы и неметаллические полезные ископаемые). Из представленных данных следует, что в процессе добычи полезных ископаемых необходимо переработать значительно бóльшие объемы горной массы, чем занимает конечный продукт: доля полезных ископаемых от общего объема переработанной горной массы составляет приблизительно 41 %, а доля попутных горных пород — 59 %. Именно общий объем переработанной горной массы и будет определять объем выбросов микрочастиц в приземный слой атмосферы. Для примера в табл. 2 приведены данные об объемах горной массы, количестве добытого угля, железной руды и выбросах частиц аэрозоля на карьерах в период 1988–1990 гг. [10, 11].

ТАБЛИЦА 2. Добыча угля и железной руды на карьерах в период 1988–1990 гг.

Производственное подразделение, предприятие	Количество разрезов	Добыча, млн т	Вскрыша, млн м ³	Горная масса, млн м ³	Выбросы аэрозоля, тыс. т
Уголь					
Башкируголь	2	4.1	16.9	19.6	5.1
Вахрушевуголь	2	3.6	21.7	24.1	6.3
Востсибуголь	9	37.8	132	157.0	40.8
Дальвостуголь	3	6.6	78.8	83.0	21.6
Красноярскуголь	6	59.6	92.9	131.0	34.1
Прокопьевск-гидроуголь	2	1.7	9.7	—	—
Северокубассуголь	1	0.85	8.0	8.6	2.2
Кузбассразрезуголь	20	60.1	386	426.0	111.0
Тулауголь	4	2.4	32.2	34.0	8.8
Приморскуголь	4	11.9	55.1	63.0	16.4
Сахалинуголь	3	1.5	17.4	18.0	4.7
Челябинскуголь	4	5.2	45.7	49	12.7
Северовостокуголь	1	1.2	6.9	8.0	2.1
Якутуголь	3	15.4	76.3	86.5	22.5
Железная руда					
Качканарский	—	42.9	41.2	52.0	6.8
Коршуновский	—	35	33.6	42.0	5.5
Ковдорский	—	16	15.4	19.0	2.3
Костомукшский	—	24	23	29.0	3.8
Оленегорский	—	15.5	14.9	19.0	2.3
Михайловский	—	39.4	37.8	48.0	6.2
Лебединский	—	43.5	41.8	53.0	6.9
Стойленский	—	15.6	15	19.0	2.3

Практически все технологические процессы при добыче полезных ископаемых на карьерах сопровождаются образованием микрочастиц в широком диапазоне размеров и выносом их в приземный слой атмосферы. Основные источники выбросов микрочастиц: дробление горной породы взрывом, бурение, выемочно-погрузочные работы и операции, связанные с перемещением горной массы, а также пылящие поверхности техногенных массивов — отвалов и хвостохранилищ. Применение взрывных технологий для дробления горной породы имеет важное отличие — массовые взрывы сопровождаются образованием пылегазового облака, верхняя кромка которого может достигать высоты нескольких километров, что вызывает загрязнение атмосферы не только карьеров, но и прилегающих к ним обширных территорий. Для количественных оценок выбросов микрочастиц при проведении горных работ на карьерах необходимо иметь представление как об объемах переработанной горной массы, так и о количестве взрывчатого вещества, используемого при выполнении взрывных работ на карьерах.

Статистические данные, приведенные в [8], свидетельствуют о значительном увеличении объемов добычи полезных ископаемых: угля, железной руды, ряда руд цветных металлов, а также гравия и щебня. Динамика их добычи в период с 2010 по 2018 г. отражена в табл. 3. Видно, что прирост добычи угля составил приблизительно 100 млн т, железной руды — 35 млн т, гальки, гравия и щебня — 120 млн м³. В ряде докладов “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации” представлены статистические данные о выбросах твердых веществ по отдельным видам деятельности в разделе “Добыча полезных ископаемых”. В [12] данные показывают, что по итогам 2010 г. при добыче угля выбросы твердых веществ увеличились на 3.3 % по отношению к предыдущему году. В [7, 13] отражены количественные данные о выбросах твердых веществ при добыче угля: в 2008 г. они составили 55.5 тыс. т, в 2016 г. — 58.4, в 2017 г. — 65.4 тыс. т. Отмечено, что с ростом добычи угля растут и выбросы твердых веществ (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Динамика добычи угля, железной руды, гравия и щебня в период 2010–2018 гг.

Год	Добыча полезных ископаемых		
	Уголь, млн т	Железная руда, млн т	Галька, гравий, щебень, млн м ³
2010	292.0	306.0	177
2011	304.0	331.0	—
2012	322.0	335.0	—
2013	319.0	332.0	—
2014	322.0	329.0	241
2015	336.0	334.0	224
2016	347.7	333.8	254
2017	369.5	339.4	265
2018	391.2	341.6	280

Основные объемы полезных ископаемых, таких как уголь, руды металлов и строительных горных пород добываются на карьерах. Рост их добычи открытым способом сопровождается увеличением количества взрывчатого вещества, применяемого для вскрышных работ. Этот процесс демонстрируют данные по добыче угля и потреблению взрывчатого вещества на предприятиях Кузнецкого угольного бассейна (Кузбасса). Если в 2010 г. в Кузбассе добыча угля составила 185.5 млн т, то в 2018 г. — уже 255.3 млн т, т. е. приблизительно 63–65 % от общей добычи угля в стране. Ежегодное потребление взрывчатого вещества при проведении работ на карьерах Кузбасса в период 1997–2018 гг. приведено в табл. 4. За последние 10 лет количество используемого взрывчатого вещества удвоилось. Несмотря на меры по модернизации взрывных технологий и изменение схем проведения массовых взрывов, количество микрочастиц горных пород, поступающих в атмосферу при взрывной отбойке горной массы, остается практически неизменным при пересчете на единицу массы взрывчатого вещества [14]. Несмотря на то, что доля выбросов предприятий по добыче полезных ископаемых достаточно стабильна, абсолютное значение массы выбросов при добыче полезных ископаемых с применением взрывных технологий непрерывно растет.

Объемы взрывных работ на карьерах распределены по регионам РФ неравномерно [15]. По состоянию на 2017 г. схема районирования территории Европейской части РФ по интенсивности взрывных работ приведена на рис. 1. Количество взрывчатого вещества, которое использовано в каждом из регионов, представлено в табл. 5. С точки зрения масштабов воздействия на окружающую среду важны не только общие объемы взрывных работ на карьерах, но и количе-

ство взрывчатого вещества, используемого при проведении единичного массового взрыва. Это количество определяет как интенсивность геоэкологической нагрузки на непосредственно прилегающую к карьере территорию (амплитуду сейсмических и акустических волн, параметры возмущений электрического и магнитного поля, объем и массу пылегазового облака), так и область влияния конкретного горнодобывающего предприятия на региональном уровне.

ТАБЛИЦА 4. Ежегодное потребление взрывчатого вещества и число техногенно-тектонических землетрясений на территории Кузбасса за период 1997–2018 гг.

Год	Потребление ВВ Q , тыс. т/год	Прирост потребления ВВ dQ , тыс. т/год	Число событий			
			$3.0 \leq m_b \leq 3.4$ $9.0 < K < 10.0$ $100 < q < 300$ т	$3.5 \leq m_b \leq 3.9$ $10.0 < K < 10.5$ $300 < q < 600$ т	$4.0 \leq m_b \leq 4.4$ $10.5 < K < 11.5$ $600 < q < 900$ т	$m_b \geq 4.5$ $K \geq 11.5$ $q > 900$ т
1997	≈100	—	—	—	—	—
1998	≈110	10	—	—	1	—
1999	≈130	20	—	—	—	—
2000	≈150	20	—	—	1	—
2001	180	30	—	—	—	—
2002	220	40	—	1	—	—
2003	240	20	—	—	—	—
2004	257	17	1	—	—	—
2005	310	53	1	—	—	—
2006	337	27	—	—	—	—
2007	368	31	4	2	1	—
2008	404	36	3	1	1	1
2009	388	–16	6	4	—	—
2010	429	41	1	3	—	—
2011	512	83	5	2	2	—
2012	583	71	1	3	1	1
2013	573	–10	7	4	5	1
2014	533	–40	11	4	1	—
2015	606	73	5	4	—	—
2016	608	2	6	6	—	2
2017	702	94	9	3	1	—
2018	843	141	10	4	1	1

Примечание: m_b — региональная магнитуда; q — масса взрывчатого вещества

С начала 90-х годов XX в. на горных предприятиях Курско-Белгородского округа, который включает такие крупные карьеры Курской магнитной аномалии, как Лебединский, Михайловский и Стойленский, наблюдается устойчивая тенденция к увеличению количества крупных взрывов с массой разового использования взрывчатого вещества. Так, количество взрывов с массой более 500 т на Лебединском горно-обогатительном комбинате (ГОКе) в период 1997–1999 гг. составило в среднем 25 взрывов в год, а на Михайловском ГОКе — 10 взрывов в год [15]. Увеличение количества используемого взрывчатого вещества при проведении массовых взрывов на карьерах обусловлено стремлением к повышению экономической эффективности всех производственных процессов и буровзрывных работ, в частности. В 2015 г. на Лебединском ГОКе осуществлен массовый взрыв с расходом ВВ 3155.2 т (объем отбитой горной массы составил 2855 тыс. м³), на Михайловском ГОКе — взрыв с расходом ВВ 2704.6 т (объем взорванной горной массы составил 1571 тыс. м³) [16]. При этом массовые взрывы на карьерах проводятся один раз в месяц.

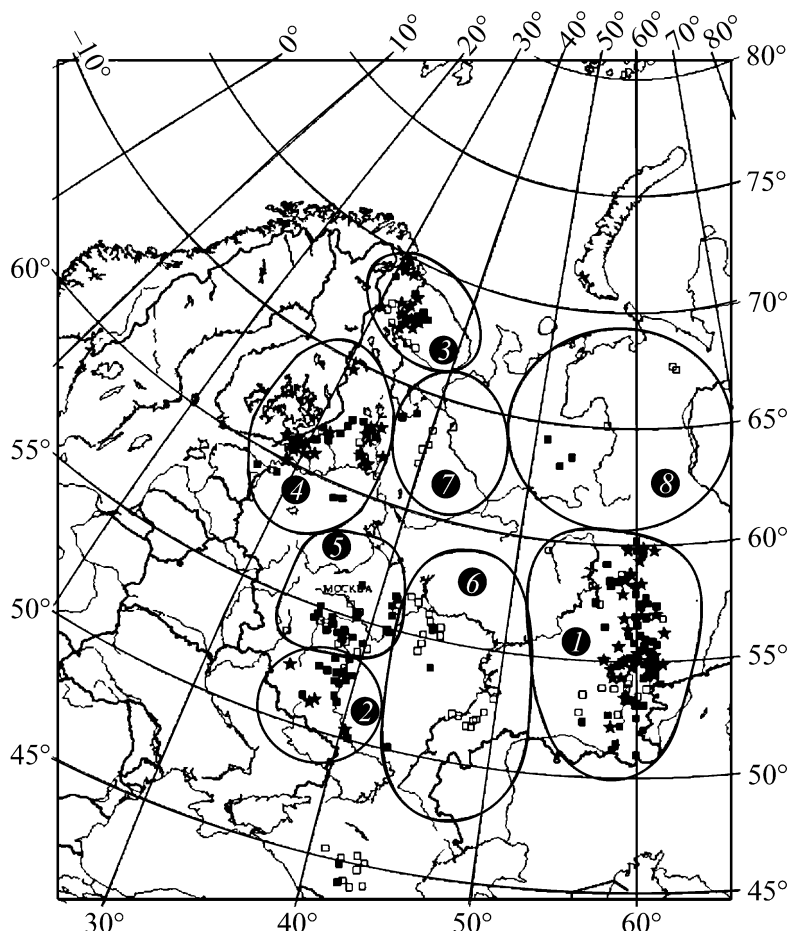


Рис. 1. Схема районирования территории Европейской части РФ по интенсивности взрывных работ. Цифрами обозначены регионы в соответствии с табл. 5. Символами отмечена масса ВВ q , использованного при проведении промышленных взрывов: ★ — значения q изменяются в диапазоне 30–2500 т; ■ — в диапазоне 1–30 т; □ — значения q меньше 10 т

ТАБЛИЦА 5. Количество использованного взрывчатого вещества по регионам на территории Европейской части РФ

Номер региона на рис. 1	Регион	Потребление ВВ, тыс. т/год
1	Уральский	150
2	Курско-Белгородский, Воронежско-Липецкий	130
3	Мурманская область	120
4	Ладожско-Онежский	70
5	Центральный	10
6	Поволжье	10
7	Архангельская область	5
8	Республика Коми	5

Наряду с изменением схемы проведения массовых взрывов происходит постоянная модернизация взрывных технологий. В процессе подготовки массовых взрывов взрывчатое вещество размещается в пробуренных в горной породе скважинах диаметром 295.5–311.0 мм. В качестве взрывчатого вещества используются приготавливаемые на месте эмульсии “Тован” и “Товаг”, которые позволили практически исключить тротилсодержащие заводские взрывчатые

вещества и заметно снизить выход в атмосферу вредных продуктов детонации. На Михайловском ГОКе создано современное производство эмульсионных взрывчатых веществ типа гранэмитов, которые наиболее подходят для взрывания крепких руд Михайловского месторождения [16]. В технологическом процессе применяется только отечественная технология производства эмульсионных взрывчатых веществ на основе российского сырья. В схеме проведения массовых взрывов на карьерах количество взрывчатого вещества, помещаемого в одну скважину, составляет приблизительно 1 т. Подготовленные к взрыву скважины располагаются рядами вдоль уступа горных пород. Одновременно подрывается группа из 3–5 скважин. Расстояние между скважинами в ряду составляет ~5 м, а между рядами скважин — 8 м. Взрывная отбойка горной массы проводится блоками, расположенными на разных участках карьера. Время между подрывом очередных блоков может составлять 1–10 с. Масса взрывчатого вещества, используемая при отбойке одного блока, изменяется в пределах 50–500 т. При такой схеме взрывания выделение энергии взрыва в пространстве и во времени происходит неравномерно, что приводит к снижению влияния сейсмических колебаний на отдельные элементы несущих конструкций зданий и сооружений, расположенных в зоне проведения массовых взрывов на открытых карьерах.

После детонации взрывчатого вещества продукты взрыва выбрасываются в атмосферу вместе с частицами разрушенной горной породы и материалом забойки. В последующем из них формируется вихревая структура, аналогичная термику, поднимающемуся в атмосфере, вследствие чего происходит дальнейшее вовлечение в облако продуктов взрыва твердых частиц разрушенной горной породы и окружающего воздуха (в центральной части скорости потока могут достигать нескольких десятков метров в секунду). В результате значительная доля в общей массе частиц в пылегазовом облаке приходится на микрочастицы ранее разрушенной породы и частицы, находившиеся на поверхности вокруг боевых скважин. Интенсивность вовлечения микрочастиц в облако продуктов взрыва зависит как от физико-механических свойств разрабатываемых горных пород, так и от ряда совместно действующих технологических факторов: крепости горных пород и удельного расхода взрывчатого вещества, размеров взрываемого блока и высоты уступа, характеристик забойки скважин и состояния поверхности вокруг них, метеорологических условий во время проведения массового взрыва и др. Влияние указанных факторов обычно учитывается на основе результатов экспериментальных исследований, проводившихся во время массовых взрывов на действующих карьерах [14, 17, 18].

В методике расчета вредных выбросов [19] для расчета массы твердых частиц m_d , выбрасываемых в атмосферу после взрыва, используется эмпирическая формула, связывающая m_d с объемом взорванной горной массы через коэффициент удельного пылевыделения q_d . Значения коэффициента q_d сводятся в таблицу в зависимости от характеристик горных пород, используемых взрывчатых веществ и ряда других факторов. Например, в результате анализа экспериментальных исследований выбросов частиц горной породы в атмосферу при проведении массовых взрывов на железорудных карьерах получены оценки удельного количества частиц пыли на объем горной массы в диапазоне значений $q_d = 29–170$ г/м³ [14]. Эти цифры относятся к массам зарядов взрывчатого вещества в пределах 30–160 т и объемам взрываемого блока горной породы $(40–260) \cdot 10^3$ м³. Необходимо учитывать, что оказавшиеся в атмосфере карьеров частицы горной породы имеют различные минералогический, химический и гранулометрический составы в зависимости от типа добываемого сырья, и это будет определять скорость оседания частиц в воздухе.

Верхний предел размеров, наблюдаемых в свободной атмосфере частиц, обусловлен действием двух процессов: оседанием частиц в поле силы тяжести и способностью турбулентной диффузии переносить частицы в более высокие слои атмосферы. Для частиц с радиусами 10–20 мкм основным процессом является гравитационное осаждение, они остаются в воздухе лишь ограниченное время и выпадают на земную поверхность в ближней зоне источника частиц на расстоянии первых километров. Более мелкие частицы активно увлекаются атмосферными потоками и загрязняют атмосферу на региональном уровне, охватывающем расстояния до сотен километров от источника частиц [20].

Особо следует отметить, что пылегазовое облако взрыва содержит также частицы в диапазоне от 1 до 1000 нм, что оказывает существенное влияние на физико-химические процессы, определяющие преобразование веществ в атмосфере. Возможность образования наночастиц при проведении массовых взрывов показана в [21, 22]. Серия экспериментальных взрывов в гранитном массиве обнаружила минимальный размер частиц 20 нм. Значительная часть наночастиц формируется в процессе дробления более крупных частиц, образовавшихся при первом взрыве. По оценкам [23, 24], при промышленных взрывах доля высокодисперсных частиц может составлять несколько процентов от массы отбитой породы, что является наиболее высоким показателем среди источников техногенных минеральных наночастиц.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА ПРИ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

В ряде работ, посвященных оценке объемов выбросов частиц горной породы и других параметров пылегазового облака взрыва, разрабатывались программные средства, включающие расчеты по эмпирическим зависимостям. С развитием методов численного моделирования появилась возможность изучать динамику пылегазовых выбросов на новом уровне детализации процессов. Несмотря на сложность описания развития пылегазового облака, подобный подход позволяет не только получать удовлетворительные данные о конкретных взрывах, но и обеспечить прогноз выбросов в атмосферу микрочастиц горной породы при взрывах различной мощности. На данном этапе разработки численной модели, включающей динамику развития пылегазового облака промышленного взрыва на открытом карьере, проведено моделирование формирования пылегазового облака взрыва заряда ВВ массой 1 т при стандартном вертикальном распределении газодинамических параметров воздуха и отсутствии ветра [25]. При проведении массовых взрывов на карьерах Лебединского и Михайловского ГОКов количество взрывчатого вещества, помещаемого в одну скважину, составляет ~ 1 т.

Моделирование эволюции облака промышленного взрыва начинают с момента времени, когда давление в возмущенной взрывом области достигает атмосферного. Предполагается: а) область представляет собой сферический объем (термик), прилегающий к поверхности и заполненный горячей пылегазовой смесью; б) уравнение состояния — идеальный газ с показателем адиабаты $\gamma = 1.4$; в) движение грубодисперсных аэрозолей подчиняется законам сплошной среды при условии, что скорость частиц равна сумме местной скорости газа и скорости стационарного осаждения частиц под действием силы тяжести.

Энергия E_0 , сосредоточенная в термике радиусом r_T , рассчитывается по выражению

$$E_0 = \frac{4}{3} \pi r_T^3 \rho \varepsilon, \quad (1)$$

где ρ — плотность пылегазовой среды; ε — удельная энергия.

Тогда, используя уравнение состояния $p = \varepsilon\rho(\gamma - 1)$, где $p = 10^5$ Па — давление, и выражение (1), можно определить радиус сферы $r_T(E_0)$. Начальная температура T_0 термика находится численным моделированием всплывания облака взрыва с массой взрывчатого вещества $q = 500$ т. Сопоставление результатов с наблюдательными и теоретическими исследованиями всплывания облака взрыва этой же энергии в течение первой минуты процесса показало, что удовлетворительное согласие достигается при $T_0 = 1250$ К [26]. Исходя из соображений подобия, эта же температура использовалась в качестве начальной и для термиков, сформировавшихся в результате взрыва ВВ массой 1 т после достижения в возмущенной области атмосферного давления.

Численное моделирование всплывания осесимметричного термика проводилось с использованием полной системы уравнений Навье-Стокса для сжимаемой жидкости в гипозвуковом приближении [27]. Турбулентная вязкость моделировалась методом крупных вихрей, применимость которого для задач всплывания высокотемпературных термиков в стратифицированной атмосфере продемонстрирована в [28]. Так же как и в [28], мы использовали дополнительное уравнение непрерывности для примеси (микрочастиц горной породы) с учетом турбулентной диффузии. Плотность примеси в этом уравнении рассчитывается как плотность пылегазовой смеси ρ , помноженной на массовую концентрацию примеси C , которая в рассматриваемом случае в начальный момент времени равна константе C_0 внутри термика и нулю вне его.

Ниже приведены результаты для случая взвешенных в газовой среде мелких частиц, т. е. скорость осаждения частиц равна нулю. Верхняя кромка облака, определяемая локализацией примеси, является параметром, задающим высоту H всплывания термика. В вычислениях использовалась подробная равномерная разностная сетка с шагом 1.6 м.

На рис. 2 представлены поля концентрации примеси и распределения скоростей в различные моменты времени. Уже к 5-й секунде отчетливо видно вихревое тороидальное облако (рис. 2а), которое всплывает и к 90-й секунде достигает высоты 700 м (рис. 2б).

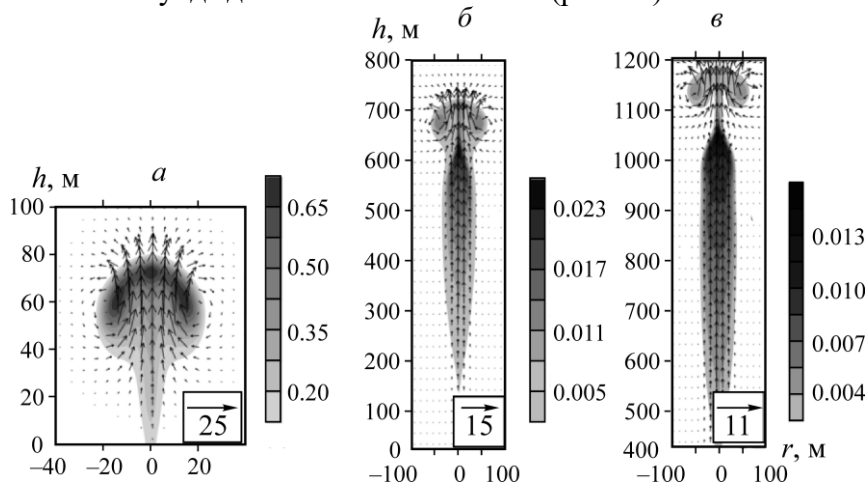


Рис. 2. Поля скоростей и относительной концентрации C / C_0 во всплывающем пылегазовом облаке в моменты времени 5 (а), 90 (б) и 180 с (в). В квадратиках приведены максимальные скорости потока (в м/с) и соответствующая этим значениям длина стрелок

Плотность всплывающего облака всюду меньше плотности окружающего воздуха на соответствующей высоте (рис. 3а). Положительной плавучестью характеризуется не только верхняя часть возмущенной области атмосферы, но и область, прилегающая к оси симметрии столба. Возле оси симметрии концентрируется и часть газа из начального сферического нагретого объема (рис. 2б). По мере всплывания облака, по крайней мере до 3 мин, картина течения не меня-

ется (рис. 2б), но плотность воздуха большей части возмущенной области становится выше окружающей (рис. 3б), что приводит к постепенному торможению облака. Незначительный запас положительной плавучести остается лишь вблизи оси. Дальнейшее всплытие облака поддерживается инерциальными силами и продолжается достаточно долго — примерно еще 3 мин (рис. 4). Максимальная высота всплытия термика достигает ~ 1700 м. Полученные расчетные данные позволяют оценить область локализации микрочастиц горной породы для дальнейшего моделирования их распространения.

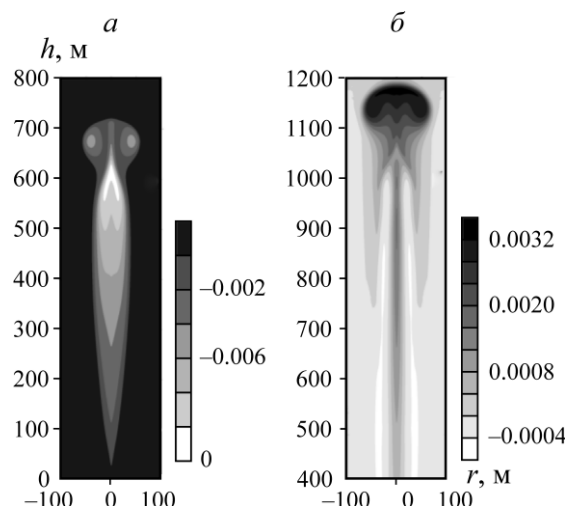


Рис. 3. Распределение относительной плотности $(\rho - \rho^*) / \rho^*$ (ρ^* — плотность невозмущенного воздуха на соответствующей высоте) в различные моменты времени: а — 90 с; б — 180 с. Области газа, цвет которых светлее фонового ($\rho = \rho^*$), характеризуются положительной плавучестью, в противном случае — отрицательной

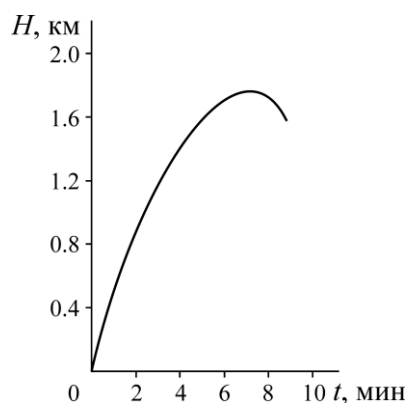


Рис. 4. Высота верхней кромки пылегазового облака в зависимости от времени

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МАССОВЫЕ ВЗРЫВЫ КАК ПРИЧИНА ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

С ростом объемов и глубины добычи полезных ископаемых, а также усложнения горнотехнических условий разработки сырьевых месторождений повышается вероятность возникновения сильных землетрясений триггерного происхождения, характеризующихся региональной магнитудой $m_b \geq 3.0$. Очаги таких землетрясений формируются в тектонически напряженных, как правило неоднородных структурах земной коры, в результате воздействия техногенных нагрузок, нарушающих природное динамическое равновесие массивов горных пород. Несмот-

ря на казалось бы невысокие магнитуды, указанные землетрясения представляют определенную опасность для регионов в связи с тем, что их очаги, расположенные в приповерхностных слоях земной коры, вызывают сейсмические колебания высокой балльности [29].

Одной из главных причин возникновения техногенно-тектонических землетрясений являются горные работы, выполняемые с применением крупных массовых промышленных взрывов. Возникающие при этом динамические воздействия на горные массивы приводят к интенсивным вибрационно-колебательным движениям, значительным подвижкам блоковых структур земной коры, а также необратимым деформациям на контактах блоков и в зонах разломов. Следствие этого — концентрация тектонических напряжений на локальных участках будущих очагов землетрясений.

Рассмотрим условия образования и развития сильных техногенно-тектонических землетрясений триггерного характера на примере территории Кузбасса. Возрастающие объемы добычи угля в сочетании с природной сейсмотектонической активностью привели к росту количества таких землетрясений. Особым событием в развитии техногенно-тектонической сейсмичности явилось катастрофическое Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г. Согласно сейсмическим данным, магнитуда события составила $M_L = 6.1$ [30]. Эпицентр землетрясения располагался практически в центре Кемеровской области на территории Бачатского угольного разреза — одного из крупнейших угледобывающих предприятий Кузбасса. В эпицентральной зоне интенсивность колебаний составила 7 баллов, что вызвало разрушение и повреждение многочисленных зданий и сооружений. В 5-балльной зоне оказались города Белово и Гурьевск, в 4-балльной — Прокопьевск, Киселевск, Новокузнецк. Расположение эпицентра на территории Бачатского разреза, небольшая глубина и высокая энергия очага, превышающая на 2–3 порядка энергию массовых взрывов, несомненно, свидетельствуют о техногенно-тектонической природе этого землетрясения.

Среди факторов, определяющих условия возникновения техногенной сейсмичности, таких как извлечение и перемещение горных пород [31–33], вибрационные и ударные воздействия на горные породы при непрерывном проведении буровых работ, изменение режима подземных вод и т. д., в качестве основного фактора следует рассматривать динамические воздействия от ведения взрывных работ. Подтверждением этому служат данные табл. 4, из которой следует, что в целом наблюдается рост числа землетрясений техногенно-тектонической природы* с ростом объемов потребляемого взрывчатого вещества.

В табл. 4 для каждого диапазона магнитуд Δm_b указан соответствующий диапазон энергетического класса ΔK , сейсмического события и диапазон изменения энергии Δq , массовых взрывов (в тоннах тротилового эквивалента). Как следует из приведенных данных, за первый период 1995–2006 гг. зарегистрировано пять техногенно-тектонических землетрясений, причем по 1–2 в каждом диапазоне магнитуд и появлявшихся не каждый год. Уровень техногенных воздействий при проведении горновзрывных работ в этот период коррелирует с ростом потребления взрывчатых веществ. Согласно табл. 4, потребление взрывчатого вещества изменилось от 100 до 337 тыс. т/год, а ежегодный прирост составил в среднем 20 тыс. т/год. В последующий период 2007–2018 гг., в течение которого потребление взрывчатого вещества увеличилось почти в 2.5 раза со 368 до 843 тыс. т/год, техногенно-тектонические землетрясения стали случаться каждый год и во всех диапазонах магнитуд. Подобные землетрясения в количестве 1–11 возникали ежегодно. На территории Кузбасса за период 1995–2018 гг. произошло около 140 техногенно-тектонических землетрясений с магнитудой $m_b \geq 3$, включая катастрофическое Бачатское.

* Выделены из общего числа землетрясений с привлечением критериев, предложенных в [6]

Представляет интерес сопоставление интенсивности наведенной сейсмичности с объемами взрывных работ. Результаты анализа между ростом объемов потребления взрывчатого вещества Q и количеством техногенно-тектонических событий N показаны на рис. 5. Прирост ежегодного потребления взрывчатого вещества dQ существенно изменялся из года в год, становясь отрицательным в годы снижения использования взрывчатых веществ.

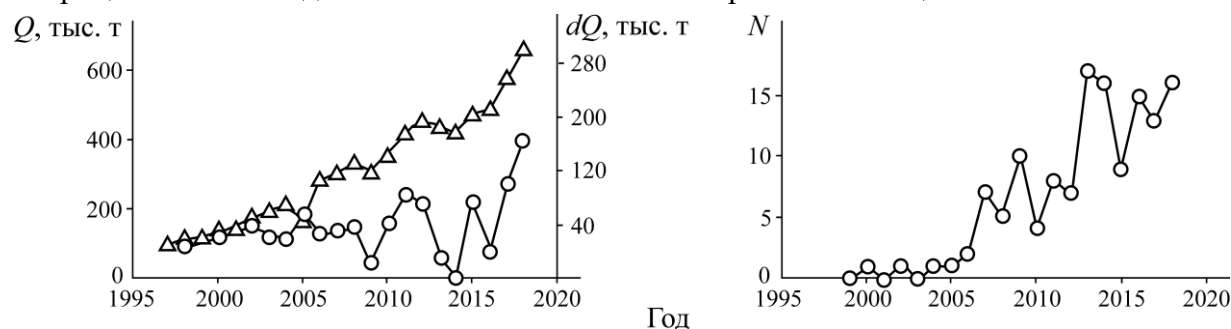


Рис. 5. Динамика ежегодного потребления взрывчатого вещества Q , (треугольники), ежегодного прироста или снижения потребления взрывчатого вещества dQ (кружочки) и числа N техногенно-тектонических землетрясений

Техногенно-тектонические события стали регулярно возникать в период 2000–2005 гг., когда происходил рост потребления взрывчатого вещества, приобретая скачкообразный характер, совпадающий со скачками в изменениях ежегодного прироста взрывчатого вещества. Отмечена определенная периодичность как в изменениях потребления взрывчатого вещества, так и в появлении техногенно-тектонических событий, а также причинная связь этого. При качественной корреляции между изменениями в потреблении взрывчатого вещества и вариациями числа техногенно-тектонических событий существует запаздывание на 1–2 (иногда на 3 года) между временем нарастания потребления ВВ и временем начала роста числа событий. Запаздывание отклика массива в виде появления техногенно-тектонических событий на воздействие взрывных работ отражает определенную инерционность в реакции геодинамического режима и процессов перестройки напряженно-деформационного состояния в структурах земной коры на влияние техногенной (в данном случае взрывного типа) нагрузки.

ВЫВОДЫ

Методы численного моделирования позволяют изучать динамику развития пылегазового облака промышленного взрыва на карьерах на новом уровне детализации процессов. Для определения локализации в тропосфере микрочастиц горной породы и их концентрации проведены газодинамические расчеты подъема пылегазовых облаков для взрывов с массой заряда взрывчатого вещества 1 т. Изучена динамика всплывания облака и получены значения максимальной высоты верхней кромки и максимальный горизонтальный размер тороидальной вихревой области в зависимости от энергии взрыва. Расчетные данные будут использованы для дальнейшего моделирования распространения в свободной атмосфере микрочастиц горной породы, захваченных облаком промышленного взрыва.

В условиях постоянного роста техногенной нагрузки, связанной с увеличением объемов добычи полезных ископаемых, на территории Кузбасса отмечен эффект воздействия крупномасштабных взрывных работ на возникновение сильных техногенно-тектонических землетрясений. Установлена качественная корреляция между появлением техногенно-тектонических землетрясений и изменениями прироста ежегодного потребления взрывчатого вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Методология оценки перспективной парадигмы развития минерально-сырьевого комплекса // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 177–187.
2. Викторов С. Д. Взрывное разрушение массивов горных пород — основа прогресса в горном деле // ГИАБ. — 2015. — № S1.
3. Михайлов О. Ю., Тарасенко Я. В. Золотой юбилей железнорудного гиганта России // Горн. журн. — 2017. — № 5. — С. 15–18.
4. Михайлов О. Ю., Черкашенко Н. А. Охрана окружающей среды — приоритетное направление работы лебединского ГОКа // Горн. журн. — 2017. — № 5. — С. 18–21.
5. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л. и др. Оценка пылевого загрязнения атмосферы угледобывающих районов кузбасса в зимний период по данным дистанционного зондирования земли // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 167–137.
6. Адушкин В. В. Влияние взрывных работ на возникновение катастрофических техногенно-тектонических землетрясений в Кузбассе // Труды V Междунар. конф. “Триггерные эффекты в геосистемах”. — М: ТОРУС ПРЕСС, 2019.
7. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году”. — М.: НИИ-Природа, 2018.
8. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году”. — М.: Минприроды России, НПП “Кадастр”. 2019.
9. Трубецкой К. Н., Рыльникова М. В. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке // ГИАБ. — 2015. — № S1-1. — С. 21–32.
10. Основные показатели работы угольной промышленности СССР: справочник / Сост. Н.И. Панков и др., 1991.
11. Предприятия и организации черной металлургии СССР: справочник, 1991.
12. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2010 году”. — 2012.
13. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2008 году”. — М.: ООО “РППР РусКонсалтингГрупп”, 2009.
14. Бересневич П. В., Михайлов В. А., Филатов С. С. Аэрология карьеров: справочник. — М.: Недра, 1990. — 280 с.
15. Адушкин В. В., Спивак А. А., Соловьев С. П., Перник Л. М., Кишкина С. Б. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах // Геоэкология. — 2000. — № 6. — С. 554–563.
16. Угаров А. А., Исмагилов Р. И., Бадтиев Б. П., Борисов И. И. Состояние и перспективы развития комплекса буровзрывных работ на горнорудных предприятиях ООО УК “Металлоинвест” // Горн. журн. — 2017. — № 5. — С. 102–106.
17. Михайлов В. А., Бересневич П. В., Борисов В. Г., Лобода А. И. Борьба с пылью в рудных карьерах. — М.: Недра, 1981. — 262 с.
18. Бересневич П. В., Наливайко В. Г. Снижение выбросов пыли и вредных газов в атмосферу карьеров и окружающую среду при массовых взрывах. — М.: Черметинформация, 1989. — Вып. 4. — 24 с.
19. Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). ИГД им. А. А. Скочинского. — Люберцы, 1999.
20. Адушкин В. В., Соловьев С. П., Шувалов В. В. Расчет пылевой нагрузки от массового взрыва на Лебединском ГОКе // Тез. докл. Междунар. Конф. “Освоение недр и экологические проблемы — взгляд в XXI век”. — М.: РАН, 2000. — С. 299–300.

21. Адушкин В. В., Перник Л. М., Попель С. И., Соловьев С. П., Шишаева А. С., Черняев Г. А., Огородников Б. И. Изучение нано- и микрочастиц при наземном химическом взрыве // Динамика взаимодействующих геосфер. — М.: ИДГ РАН, 2004.
22. Адушкин В. В., Перник Л. М., Попель С. И. Наночастицы в опытах по разрушению скальных пород взрывом // ДАН. — 2007. — Т. 415. — № 2. — С. 247–250.
23. Трубецкой К. Н., Викторов С. Д., Галченко Ю. П., Одинцев В. Н. Техногенные минеральные наночастицы как проблема освоения недр // Вестн. РАН. — 2006. — Т. 76. — № 4. — С. 318–332.
24. Викторов С. Д. Образование микро- и наночастиц в технологических процессах горного производства и разработка новых методов оценки катастрофических явлений // ГИАБ. — 2011. — № S1.
25. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. — М: ИПК Изд-во стандартов, 2004.
26. Адушкин В. В., Соловьев С. П., Спивак А. А. Электрические поля техногенных и природных процессов. — М.: ГЕОС, 2018. — 459 с.
27. Затевахин М. А., Кузнецов А. Е., Никулин Д. А., Стрелец М. Х. Численное моделирование процесса всплывания системы высокотемпературных турбулентных термиков в неоднородной сжимаемой атмосфере // ТВТ. — 1994. — Т. 32. — № 1.
28. Хазинс В. М. Метод крупных вихрей в задачах всплывания высокотемпературных термиков в стратифицированной атмосфере // ТВТ. — 2010. — Т. 48. — № 3.
29. Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. — 2016. — № 2. — С. 20–44.
30. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Т. Техногенная сейсмичность разрезв Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013) // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 41–46.
31. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. — М.: ИДГ РАН, 2015. — 364 с.
32. Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б. Об инициировании тектонических землетрясений, вызванных открытыми горными работами // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 45–53.
33. Кочарян Г. Г., Куликов В. И., Павлов Д. В. О влиянии массовых взрывов на устойчивость тектонических разломов // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 49–58.

Поступила в редакцию 07/III 2020

После доработки 17/III 2020

Принята к публикации 10/IV 2020