

УДК 622.271:351.77

МИКРОЧАСТИЦЫ В АТМОСФЕРЕ ОТ ЛИТОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

© 2021 г. В. В. Адушкин^{1, *}, С. П. Соловьев^{1, **}

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru

**E-mail: soloviev@idg.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 19.03.2021 г.

После доработки 30.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Приведен краткий обзор техногенных источников микрочастиц, связанный с извлечением минерального сырья и топлива из литосферы. Рассмотрение сосредоточено на выбросах частиц горной породы в процессе добычи полезных ископаемых открытым способом. На примере добычи угля получены оценки выбросов микрочастиц в приземный слой атмосферы. Анализ проводился на основе данных о пылевыведении при различных технологических операциях в горных работах и их общего объема. Полученные оценки выбросов микрочастиц при добыче угля открытым способом в мире следует учитывать при анализе общего аэрозольного баланса атмосферы в разделе техногенные источники, поскольку эти оценки очень близки к массе выбросов от автотранспорта и превосходят выбросы авиационного и морского флота. Динамика оценок выбросов микрочастиц при добыче угля в мире за период с 2010 по 2019 гг. показывает, что выбросы увеличились примерно на 12% по отношению к 2010 г. — это также соответствует росту мировой добычи угля открытым способом.

Ключевые слова: микрочастицы в атмосфере, открытые горные работы, массовые промышленные взрывы, геоэкология.

DOI: 10.31857/S0002333721050021

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера Земли, помимо газовых примесей, содержит множество жидких и твердых микрочастиц, которые существуют в виде дисперсных фаз в воздухе — аэрозолей. Атмосферные аэрозоли являются важным фактором в процессах взаимодействия в системе литосфера—атмосфера [Адушкин, Попель, 2012]. Хотя концентрация аэрозолей значительно ниже, чем основных компонент воздуха, но они играют очень важную роль во многих метеорологических, физических и химических процессах, происходящих в атмосфере. К ним относятся: конденсация водяного пара на небольших ядрах и последующее образование тумана и облачных капель; химические реакции, приводящие к образованию кислотных осадков; изменение параметров рассеяния и поглощения как поступающего солнечного (коротковолнового) излучения, так и теплового земного (длинноволнового) излучения и др. процессы [Andreae, 1995; Ивлев, Довгалюк, 1999; Sathesh, Moorthy, 2005; Кондратьев, 2006; Гинзбург и др., 2008; Atmospheric Aerosols, 2017]. Существенное влияние аэрозоли оказывают и на электрические параметры атмосферы, поскольку взаимодействие аэро-

зольных частиц с атмосферными ионами приводит к изменению их спектрального состава в сторону тяжелых ионов и, как следствие, уменьшению электропроводности воздуха. Но особенно сильное влияние на электрические параметры атмосферы оказывают выбросы радиоактивных аэрозольных частиц: увеличивается степень ионизации воздуха, увеличивается электропроводность и изменяется напряженность электрического поля [Морозов, Куповых, 2012]. Масштабы влияния выбросов радиоактивных аэрозольных частиц в атмосферу могут иметь не только локальный, но и континентальный характер. Такое влияние проявилось после Чернобыльской аварии в 1986 г. [Смирнов, 1991; Морозов, Куповых, 2012] и аварии на АЭС “Фукусима-1” в 2011 г. [Авария на АЭС..., 2013].

Влияние аэрозолей на атмосферные процессы изучено еще недостаточно полно и особенно заметно это проявляется при обсуждении проблемы воздействия аэрозолей на климат. Вклад атмосферного аэрозоля остается одним из главных факторов неопределенностей оценок роли различных климатообразующих процессов [Кондратьев, 2006]. Воздействие аэрозолей обычно подразделяется на прямое и косвенное. Прямое воздей-

стве заключается в том, что аэрозоли рассеивают и поглощают солнечное и тепловое излучения и тем самым изменяют радиационный баланс атмосферы и подстилающей поверхности. Наряду с природными аэрозолями существенное воздействие на потоки солнечного и теплового излучения оказывают техногенные аэрозоли, содержащие сульфаты, органический углерод и сажу (черный углерод) от сжигания топлива и биомассы, а также микрочастицы, попадающие в атмосферу и на поверхность Земли в результате хозяйственной деятельности.

Роль черного углерода (ЧУ) как климатообразующего фактора была отмечена, когда в конце 60-х гг. прошлого века получили первые результаты изучения явлений Арктической дымки [Rosen et al., 1981]. Проблема влияния ЧУ на радиационный баланс, с точки зрения поглощения солнечной радиации аэрозолями и последующего прямого радиационного воздействия, вызванного аэрозолями, остается актуальной темой и в современных исследованиях [Bond et al., 2013; Huang et al., 2015; Atmospheric Aerosols, 2017; Виноградова, Титкова, 2020]. Крупнейшие мировые источники ЧУ связаны с открытым выжиганием лесов и саванн, но большая часть содержащихся в атмосфере микрочастиц ЧУ обусловлена антропогенной деятельностью [Bond et al., 2013]. В частности, микрочастицы ЧУ, переносимые из сильно загрязненных районов Европы в сторону Арктики, могут оказать существенное влияние на облачные процессы, на таяние снега и ледяного покрова в этом районе. Эффекты воздействия микрочастиц рассчитываются с помощью климатических моделей, но, когда это возможно, они оцениваются с помощью полевых наблюдений и микрофизических измерений. По оценкам приведенным в работе [Huang et al., 2015] суммарные антропогенные выбросы ЧУ в России в 2010 г. составили 224 тыс. т.

Выбросы твердых веществ от всех стационарных источников на территории России значительно превосходят выбросы ЧУ, в 2010 г. эти выбросы составили 2283.1 тыс. т [Государственный доклад..., 2012], выбросы твердых веществ в атмосферу от источников, связанных с добычей полезных ископаемых, сравнимы с оценками выбросов ЧУ — 392.8 тыс. т. Химические, физические, в том числе и оптические, свойства микрочастиц определяются специфическими характеристиками их источников и в результате оказывают различное влияние на радиационный баланс и загрязнение окружающей среды. Например, в регионах интенсивной добычи полезных ископаемых, таких как уголь, влияние выбросов твердых микрочастиц на спектральные характеристики поверхности в видимой и инфракрасной областях были обнаружены в зимний период [Опарин и др., 2014].

Как правило, облака микрочастиц, выбрасываемых в приземный слой атмосферы различными источниками, представляют собой полидисперсные структуры, одной из важных характеристик которых является их гранулометрический состав. Очень мелкие частицы за счет действия внутренних сил сцепления и ничтожно малых скоростей гравитационного оседания будут образовывать новые частицы увеличенных размеров, в результате размер изучаемых аэрозольных частиц ограничиваются диапазоном от нескольких нанометров до нескольких десятков микрон [Atmospheric Aerosols, 2017]. Частицы с размерами более сотен микрон не считаются принадлежащими к классу крупных аэрозолей, так как у них очень короткое время жизни. 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.

Принципиальной особенностью добычи полезных ископаемых является разрушение горных пород до размеров куска, определяемого технологией переработки. До настоящего времени наиболее эффективным способом разрушения горных пород остается использование энергии взрыва [Викторов, 2015; Михайлов, Тарасенко, 2017; Silva et al., 2019; Викторов и др., 2019]. Применение взрывных технологий для дробления горной породы имеет важное отличие от других технологических операций, используемых при разработке открытых горных карьеров. В результате массовых взрывов происходит не только разрушение горной породы, но и образование мощных пылегазовых облаков в приземном слое атмосферы — после детонации взрывчатых веществ продукты взрыва выбрасываются в атмосферу вместе с частицами разрушенной горной породы. Особо следует отметить, что пылегазовое облако взрыва содержит частицы и в нанометровом диапазоне размеров. Возможность образования наночастиц при проведении массовых взрывов показана в работах [Адушкин и др., 2004; 2007]. Значительная часть наночастиц формируется в процессе разрушения более крупных частиц, при многократном дроблении. По оценкам работ [Викторов, 2011; Трубецкой и др., 2006], при промышленных взрывах доля высокодисперсных частиц может составлять несколько процентов от массы отби-

той породы, что является наиболее высоким показателем среди источников техногенных минеральных наночастиц.

Таким образом, неослабевающее внимание научного сообщества к проблеме загрязнения окружающей среды аэрозольными микрочастицами и их влияния на здоровье населения подтверждает актуальность задачи изучения физических, химических и других свойств микрочастиц в природных средах. Микрочастицы характеризуются повышенной сорбционной емкостью по сравнению с частицами более крупного размера, поэтому они способны накапливать повышенные уровни многих вредных загрязняющих веществ. Обладая малым размером, микрочастицы способны длительное время находиться во взвешенном состоянии в атмосфере и переноситься на далекие расстояния.

Цель настоящей работы — анализ данных о выбросах микрочастиц в атмосферу от техногенных источников и, в частности, о выбросах частиц горной породы в процессе добычи полезных ископаемых на открытых карьерах. Основное внимание уделяется оценке выбросов микрочастиц в приземный слой атмосферы при добыче угля открытым способом как на территории России, так и в мире в целом.

ТЕХНОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ВЫБРОСОВ МИКРОЧАСТИЦ

Индустриальный и постиндустриальный период развития общества сопровождается опережающим ростом темпов добычи вещества литосферы в виде минерального сырья и топлива. По оценкам из литосферы ежегодно добывается от сотни миллиардов до триллиона тонн твердого вещества, при этом значительная доля переработанной горной массы приходится на добычу полезных ископаемых открытым способом [Викторов, 2015; Трубецкой, Галченко, 2015]. Экономика многих стран зависит от производства и потребления широкого спектра полезных ископаемых, что ведет к расширению деятельности по добыче полезных ископаемых. Как отмечено в работе [Трубецкой, Галченко, 2015], постоянное увеличение темпов роста общественного потребления происходит исключительно на основе экстенсивных методов развития минерально-сырьевого комплекса, при которых количество отходов обычно соизмеримо с количеством добытого вещества литосферы, использованного в хозяйственных целях. Минерально-сырьевой комплекс дает исходные материалы для производства более чем 70% всей номенклатуры конечной продукции современного общества и обеспечивает почти 90% его энергетических потребностей. Поэтому все производственные процессы, связанные с добычей полезных ископаемых и их даль-

нейшей промышленной переработкой, потенциально являются одними из основных источников выбросов микрочастиц в приземный слой атмосферы. Немаловажно, что микрочастицы техногенного происхождения вследствие своего химического состава в большинстве случаев намного превосходят природный материал по негативному воздействию как на человека, так и на среду обитания в целом.

Техногенные выбросы в атмосферу распределены по земному шару неравномерно. Основные их источники сосредоточены в индустриальных странах, и связано это с интенсификацией и ростом объемов производства, увеличением населения, урбанизацией, развитием транспортной индустрии. Следует также отметить, что совершенствование технологий очистки выбросов и экономические санкции против предприятий, загрязняющих окружающую среду, в развитых странах позволяют последовательно снижать вклад в аэрозольное загрязнение, однако в развивающихся странах, наоборот, наблюдается рост загрязняющего воздействия [IPCC, 2014; Klimont et al., 2017].

В ряде работ, в которых анализируются техногенные выбросы аэрозолей, выделяют следующие категории источников: промышленные предприятия; установки для сжигания топлива; источники, связанные с ветровой эрозией пахотных земель, строительством, дорожной пылью; транспорт всех видов [Атмосфера, 1991; Atmospheric Aerosols, 2017]. Техногенные аэрозоли состоят как из первичных частиц, так и вторичных частиц, образующихся из газов, выбрасываемых в результате промышленной и других видов деятельности. В настоящей работе основное внимание уделяется первичным микрочастицам, поступающим в приземный слой атмосферы.

Статистические данные о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу в нашей стране 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 твердые вещества, диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода. В докладах используются термины “твердые вещества” и “взвешенные вещества” без обсуждения их гранулометрического состава. Также отдельно приводятся данные о выбросах загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников. Наряду с этим в докладах приводятся данные о структуре выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников по видам экономической деятельности. Так, распределение объема выбросов по видам экономической деятельности осуществ-

Таблица 1. Динамика выбросов твердых веществ в атмосферный воздух в период 2000–2019 гг.

Годы	Выбросы твердых веществ в атмосферный воздух от стационарных источников. Всего, тыс. т	Выбросы твердых веществ от предприятий по добыче полезных ископаемых, тыс. т	Доля выбросов предприятий по добыче полезных ископаемых от общего объема выбросов, %
2000	2972.2	—	—
2001	2973.2	—	—
2002	2882.8	—	—
2003	2870.0	—	—
2004	2860.0	—	—
2005	2800.0	500.0	17.8
2006	2840.0	470.1	16.6
2007	2743.4	453.6	16.5
2008	2704.2	431.8	16.0
2009	2341.0	399.5	17.06
2010	2283.1	392.8	16.5
2011	2283.1	—	—
2012	2249.4	—	—
2013	2008.5	375.3	18.7
2014	1922.2	—	—
2015	1820.4	329.6	18.1
2016	1723.9	—	—
2017	1728.9	—	—
2018	1509.0	—	—
2019	1611.4	—	—

ляется в следующей градации [Государственный доклад..., 2020]: 1 – “обрабатывающие производства” (например, в 2014 г. доля этих выбросов составляла 34.0% от общего объема выбросов стационарных источников, в 2017 г. – 33.2%, в 2019 г. – 33%); 2 – “добыча полезных ископаемых” (в 2014 г. – 28.3%, в 2017 г. – 28.1%, в 2019 г. – 28.5%); 3 – “обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха” (в 2017 г. – 20.3%, в 2019 г. – 17.3%); 4 – сельское хозяйство, лесное хозяйство, охота, рыболовство; 5 – прочие виды выбросов. Основная масса выбросов от стационарных источников приходится на предприятия и организации, расположенные на территории городов и городских округов.

Представляют интерес статистические данные о выбросах твердых веществ от стационарных источников как от всех видов экономической деятельности в целом, так и от добычи полезных ископаемых. В результате по данным, включенным в Государственные доклады “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации” за период с 2000 по 2019 гг., можно проследить динамику выбросов твердых веществ от стационарных источников (табл. 1). В 2019 г. выбросы твердых веществ увеличились на 6.8% относи-

тельно 2018 г., что может быть связано с ростом промышленного производства. Данные по выбросам от предприятий по добыче полезных ископаемых в докладах приведены не для каждого календарного года. Тем не менее, доля выбросов предприятий по добыче полезных ископаемых от общего объема выбросов достаточно стабильна и находится в пределах 16–19%. Сокращение общих объемов выбросов твердых веществ с 2000 г., как это следует из табл. 1, приближается к двукратному. В докладе за 2018 г. сокращение выбросов микрочастиц объясняется “относительной простотой и меньшими затратами на проведение мероприятий по улавливанию, обезвреживанию и снижению их образования” [Государственный доклад..., 2019].

Наряду с этим 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”. Эти данные носят фрагментарный характер и приводятся не для каждого календарного года. Например, данные, приведенные в работе [Государственный доклад..., 2012], показывают, что по итогам 2010 г. при добыче угля выбросы

Таблица 2. Добыча угля в России в период с 1995 по 2019 гг.

Годы	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Добыча, млн т	262.8	258.4	299.8	323.4	336.7	354.6	352.1	358.2	374	386.9	411.2	441.9	441.4
Открытый способ	152.2	167.5	195.1	221.3	236	248.9	250.8	252.9	270.4	282.6	305.7	332.5	334.1
Подземный	110.6	90.9	104.7	102.1	100.7	105.7	101.3	105.3	103.6	104.3	105.5	109.4	107.3

твердых веществ увеличились на 3.3% по отношению к предыдущему году. Количественные данные о выбросах твердых веществ при добыче угля за ряд лет содержатся в работе [Государственный доклад..., 2018]: в 2008 г. они составили 55.5 тыс. т, в 2016 г. — 58.4 тыс. т, в 2017 г. — 65.4 тыс. т. В работе [Таразанов, Губанов, 2020] приведен обзор итогов работы угольной промышленности России по состоянию на 2019 г. На территории страны находятся 22 угольных бассейна и 129 отдельных месторождений (насчитывается 187 предприятий, из них шахты — 57, угольные разрезы — 130). На рисунке приведена схема расположения угольных бассейнов России. В табл. 2 приведены объемы добычи угля по способам добычи [Таразанов, Губанов, 2020]. По данным за 2019 г. удельный вес открытого способа в общей добыче составил 75.7%. Как видно из табл. 2, добыча подземным способом находится приблизительно на

одном уровне, а добыча угля открытым способом непрерывно растет. Увеличение выбросов твердых веществ соответствует данным об увеличении объемов добычи угля.

Независимые оценки выбросов твердых веществ в атмосферу при производстве работ на открытых карьерах можно получить по методике, основанной на анализе данных о пылевыведении при различных технологических процессах в горных работах и их общего объема. В настоящее время на открытых карьерах добывают 80–93% руд черных и цветных металлов, 75% угля, практически 100% строительных горных пород [Таразанов, Губанов, 2020; Трубецкой, Рыльникова, 2015]. При добыче полезных ископаемых на открытых карьерах в результате разрушения горной породы практически все технологические процессы сопровождаются образованием твердых частиц в широком диапазоне размеров и выносом



Рис. 1. Схема расположения угольных бассейнов Российской Федерации: 1 — Донецкий бассейн; 2 — Подмосковский бассейн; 3 — Южно-Уральский бассейн; 4 — Мурманская область — Архипелаг Шпицберген; 5 — Печорский бассейн; 6 — Горловский бассейн; 7 — Кузнецкий бассейн; 8 — Минусинский бассейн; 9 — Канско-Ачинский бассейн; 10 — Тунгусский бассейн; 11 — Улуг-Хемский бассейн; 12 — Иркутский (Черемховский) бассейн; 13 — месторождения Бурятии и Забайкалья; 14 — Южно-Якутский бассейн; 15 — Зырянский бассейн; 16 — Ленский бассейн; 17 — Сахалинский бассейн; 18 — Нижне-Зейский бассейн; 19 — Буреинский бассейн; 20 — Бикино-Уссурийский бассейн; 21 — Раздольненский бассейн; 22 — месторождения севера Дальнего Востока (адаптировано из работы [Григорьев, Куршов, 2019]).

их в приземный слой атмосферы [Бересневич и др., 1990; Csavina et al., 2012; Jain et al., 2016; Patra et al., 2016; Assessment, 2017]. Как упоминалось выше, для частиц, которые выбрасываются в атмосферу в процессе горных работ и имеют радиусы более 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. Более мелкие частицы активно увлекаются атмосферными потоками и переносятся на расстояния до сотен километров от источника частиц. Ниже рассматриваются твердые частицы с размерами менее 10–20 мкм и используется термин – микрочастицы.

Основными источниками выбросов микрочастиц на открытых карьерах являются: бурение, дробление горной породы взрывом, выемочно-погрузочные работы и операции, связанные с перемещением горной массы, а также пылящие поверхности техногенных массивов – отвалов и хвостохранилищ. Наиболее распространенным методом оценки выбросов частиц горной породы и других загрязняющих веществ в атмосферу являются расчеты по эмпирическим зависимостям на основе коэффициентов выбросов [Бересневич и др., 1990; Викторов, Бутысин, 1996; Roy et al., 2010; Huertas et al., 2012; Patra et al., 2016]. Эти зависимости являются эмпирическими по своей природе и были разработаны на основе результатов экспериментальных исследований, проводившихся в процессе эксплуатации карьеров в соответствии с конкретной геометрией, типом горных пород, метеорологическими условиями и т.д. Основным элементом этих формул являются коэффициенты выбросов, которые обычно выражаются в виде веса загрязняющего вещества, деленного на единицу веса, объема, расстояния или продолжительности технологических операций на карьерах. Данные о коэффициентах выбросов для различных технологических операций содержатся в рекомендациях, разработанных в основных добывающих странах (в США это Агентство по охране окружающей среды – [USEPA, 1991; USEPA, 1998], в Австралии – [National Pollutant Inventory, 1999], в России – [Методика..., 1999] и т.д.). Рассмотрим оценки выбросов микрочастиц в атмосферу на примере открытых угольных карьеров.

ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ МИКРОЧАСТИЦ ЧАСТИЦ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

В практике разрушения горных пород использование энергии взрыва остается наиболее эффективным способом. При добыче большинства полезных ископаемых взрывная отбойка горной массы является основной технологией при подго-

товке горных пород к выемке. Современные исследования в области разработки новых технологий добычи полезных ископаемых и разрушения горных пород показывают, что подобная ситуация сохранится и в ближайшие десятилетия [Викторов, 2015; Zhang, 2016; Михайлов, Тарасенко, 2017; Silva, 2019]. Следует отметить, что на первых этапах разработки открытых карьеров проводятся вскрыши (грунт и горные породы, лежащие под поверхностью и над месторождением) для доступа к интересующим минералам. В работе [Трубецкой, Галченко, 2015] 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 большие объемы горной массы, чем занимает конечный продукт: в среднем 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. При добыче угля объемы вскрышных пород могут превосходить объемы добытого угля до 10 раз.

В процессе подготовки массовых взрывов взрывчатое вещество (ВВ) размещается в пробуренных в горной породе скважинах диаметром до 300 мм и более [Угаров и др., 2017]. Бурение скважин связано с выбросами в атмосферу частиц горной породы, которые зависят от типов и количества буровых станков, времени их работы, влажности горной массы и применяемых средств пылеподавления. В процессе бурения наблюдаются достаточно высокие концентрации микрочастиц в непосредственной близости от места проведения работ. Для наиболее типичных условий бурения вскрышных пород доля частиц с линейными размерами менее 50 мкм составляет в среднем 12–15% от общей массы образующихся продуктов разрушения [Методика..., 1999]. Буровые станки, как правило, оборудуются системами пылеулавливания, но во многих случаях разрушенная при бурении горная порода сбрасывается в непосредственной близости от скважин.

Применение взрывных технологий для дробления горной породы имеет важное отличие от других технологических операций – массовые взрывы сопровождаются образованием пылегазового облака, верхняя кромка которого может достигать высоты нескольких километров [Адушкин и др., 2020; Khazins et al., 2020; Khazins, Soloviev, 2020], что вызывает загрязнение атмосферы не только карьеров, но и прилегающих к ним обширных территорий. После детонации ВВ продукты взрыва выбрасываются в атмосферу вместе

с частицами разрушенной горной породы и материалом забойки. В последующем из них формируется вихревая структура, аналогичная термику, поднимающаяся в атмосфере, вследствие чего происходит дальнейшее вовлечение в облако продуктов взрыва частиц разрушенной горной породы и окружающего воздуха (в центральной части скорости потока могут достигать нескольких десятков метров в секунду [Khazins et al., 2020]). В результате значительная доля в общей массе частиц в пылегазовом облаке приходится на микрочастицы ранее разрушенной породы и частицы, находившиеся на поверхности вокруг 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 [Бересневич и др. 1990; Методика..., 1999; Викторов, Бутысин, 1996].

При добыче угля, в зависимости от горно-геологических условий, объем взрывных работ относительно экскавации в технологическом цикле различен. Эффективная разработка скальных и полускальных пород экскаваторами циклического действия возможна только после их предварительной взрывной подготовки. По данным работы [Мельников, 1982], доля взрывных работ на угольных разрезах РФ составляет от 10 до 90%, при этом доля менее 50% приходится на неглубокие маломощные разрезы. В настоящее время на разрезах Кузнецкого угольного бассейна (Кузбасса) около 80% общего объема вскрыши разрабатывается с применением буровзрывных работ [Ташкинов и др., 2010]. В работе [Тимофеева, Мурзин, 2015] на примере Черемховского угольного разреза показано распределение объемов выбросов микрочастиц при различных технологических операциях на карьере. Отработка вскрышных пород и междупластья производится с применением буровзрывных работ. Пласты угля имеют мощность от 2 до 4.2 м. Вскрыша составляет от 10 до 42 м. Наибольшее количество микрочастиц дают технологические вскрыши и отвалообразование (порядка 600–700 т в год), бурение – 10 т в год, погрулочные процессы – 15 т в год.

Рост добычи угля открытым способом сопровождается и увеличением количества ВВ, применяемого в процессе работ на карьерах. Это демонстрируют данные по добыче угля и потреблению

ВВ на предприятиях Кузбасса [Адушкин и др., 2020]. Если в 2010 г. в Кузбассе добыча угля составила 185.5 млн т, то в 2018 г. – уже 255.3 млн т. Ежегодное потребление ВВ при проведении работ на карьерах Кузбасса в период 1998–2018 гг. приведено в табл. 3. За последние 10 лет количество используемого ВВ удвоилось.

Массу выбросов микрочастиц при проведении массовых взрывов можно получить, зная величину удельных выбросов на 1 кг ВВ и ежегодное потребление ВВ. Следует отметить, что 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, изменяется в узких пределах при пересчете на единицу массы ВВ [Бересневич и др., 1990]. Удельные расходы ВВ на отбойку 1 м³ горной породы на угольных разрезах в разных странах находятся в пределах 0.4–0.7 кг/м³, соответственно, и коэффициенты выбросов микрочастиц будут иметь близкие значения. Так, в работе [National Pollutant Inventory..., 1999] приведены эмпирические данные, полученные на угольных разрезах Австралии: коэффициенты выбросов $q_{\text{ВВ}}$ (т.е. масса частиц, приходящаяся на 1 кг ВВ) для частиц с размерами 0–30 мкм дают значение $q_{\text{ВВ}} = 0.101$ кг/кг ВВ. Для оценок примем значение $q_{\text{ВВ}}$ в диапазоне от 0.08 до 0.1 кг/кг ВВ. В табл. 3 приведены оценки массы выбросов микрочастиц на угольных разрезах Кузбасса по ежегодному потреблению ВВ: $M_d = q_{\text{ВВ}} Q$.

Аналогичные оценки могут быть получены, исходя из годовых объемов $V_{\text{гп}}$ горной породы, отбитой при проведении массовых взрывов в работе [Методика..., 1999]. Расчеты проводятся по эмпирической зависимости вида: $M_{\text{гп}} = q_{\text{тч}} V_{\text{гп}}$, где $q_{\text{тч}}$ – удельные выбросы микрочастиц из 1 м³ горной породы. Коэффициент $q_{\text{тч}}$ зависит от крепости горной породы, рецептуры ВВ и ряда других параметров. В [Методика..., 1999] приведены значения этого коэффициента в виде таблиц. Для расчетов возьмем значения $q_{\text{тч}}$ в диапазоне 0.03–0.06 кг/м³. Объемы $V_{\text{гп}}$ рассчитываются на основе данных по годовой добыче угля. Полученные оценки выбросов микрочастиц на угольных разрезах Кузбасса при проведении массовых взрывов приведены в табл. 4. Видно, что эти оценки хоть и отличаются, но, в целом, удовлетворительно соответствуют друг другу.

Для экскавации нормативные и опытные данные приводятся в виде интенсивности пылевыделения [Михайлов и др., 1981; Бересневич и др., 1990; Методика..., 1999]. Так, для одноковшовых экскаваторов нормативная интенсивность пылевыделения составляет 2 г/с. Экспериментальные данные для данного типа машин с различной

Таблица 3. Оценка массы выбросов микрочастиц на карьерах Кузбасса в период 1998–2018 гг.

Годы	Потребление ВВ, Q , тыс. т/год	Прирост потребления ВВ, dQ , тыс. т/год	Масса выбросов по расходу ВВ, M_d , тыс. т
1998	≈110	10	8.8–11.0
1999	≈130	20	10.4–13.0
2000	≈150	20	12.0–15.0
2001	180	30	14.4–18.0
2002	220	40	17.6–22.0
2003	240	20	19.2–24.0
2004	257	17	20.6–25.7
2005	310	53	24.8–31.0
2006	337	27	27.0–33.7
2007	368	31	29.4–36.8
2008	404	36	32.3–40.4
2009	388	–16	31.0–38.8
2010	429	41	34.3–42.9
2011	512	83	41.0–51.2
2012	583	71	46.6–58.3
2013	573	–10	45.8–57.3
2014	533	–40	42.6–53.3
2015	606	73	48.5–60.6
2016	608	2	48.6–60.8
2017	702	94	56.2–70.2
2018	843	141	67.4–84.3

Таблица 4. Оценки массы выбросов микрочастиц на карьерах Кузбасса при проведении массовых взрывов

Годы	Добыча угля, $M_{\text{доб}}$, млн. т	Расход ВВ, $Q_{\text{ВВ}}$, тыс. т	$q_{\text{ВВ}}$, кг/кг ВВ	Масса выбросов по расходу ВВ, M_d , тыс. т	Горная масса, $V_{\text{ГМ}}$, млн м ³	$q_{\text{ГЧ}}$, кг/м ³	Масса выбросов по горной породе, $M_{\text{ГП}}$, тыс. т
2010	185.5	429	0.08–0.1	34.3–42.9	792–1060	0.03–0.06	23.8–63.6
2018	255.3	843	0.08–0.1	67.4–84.3	1093–1459	0.03–0.06	32.8–87.5

производительностью находятся в пределах 0.4–2 г/с при добыче угля и 0.1–1.4 г/с при добыче рудных ископаемых. Для других экскаваторов (роторные, экскаваторы типа драглайн и т.д.) также установлены величины интенсивности пылевыведения. Зная производительность экскаватора, можно вычислить коэффициент пылевыведения. Например, для внутрикарьерного участка производительностью 400 м³/ч карьера Новокриворожского горно-обогатительного комбината вычисленный коэффициент пылевыведения имеет значение 8–10 г/м³ при годовой производительности 10.5 млн т руды [Справочник..., 1982]. В результате средние значения коэффициентов пылевыведения при экскавации лежат в пределах от 8 до 20 г/м³.

Ведение вскрышных работ на карьерах и обогащение руды на фабриках ГОКов привели к необходимости формирования отвалов и строительства хвостохранилищ. Выброс микрочастиц при отвалообразовании вскрышных пород осуществляется, независимо от способов отвалообразования, точечными, линейными и плоскостными источниками. Точечные источники – экскаваторы, бульдозеры, крупнотоннажные автомобили. Все транспортные средства оснащены мощными дизельными двигателями при работе которых в атмосферу выбрасывается значительное количество частиц сажи (ЧУ). Линейные источники – конвейеры, железнодорожные составы, автодороги. Общим для всех способов отвалообразования является образование больших незакрепленных поверхностей (плоскостных источников), кото-

Таблица 5. Оценки массы выбросов микрочастиц при добыче угля в мире, в Китае и России

Годы	Страны	Добыча угля, млн т	Добыча угля открытым способом, $M_{\text{доб}}$, млн т	Горная масса, $V_{\text{ГМ}}$, млн м ³	Масса выбросов по горной породе, $M_{\text{ГП}}$, тыс. т
2010	В мире	7254.6	5440.95	23318.4–31091.1	1119.3–3109.1
	Китай	3235.0	2426.25	10398.2–13864.3	499.1–1386.4
	Россия	323.4	242.55	1039.5–1386.0	49.9–138.6
2015	В мире	7861.1	5895.83	25267.8–33690.4	1212.9–3369.0
	Китай	3747.0	2810.25	12043.9–16058.6	578.1–1605.9
	Россия	374.0	280.50	1202.1–1602.9	57.7–160.3
2019	В мире	8129.4	6097.05	26130.2–34840.3	1254.3–3484.0
	Китай	3846.0	2884.50	12362.1–16482.9	593.4–1648.3
	Россия	441.4	331.05	1418.8–1891.7	68.1–189.2

рые при неблагоприятных условиях приводят к интенсивному пылеобразованию, зависящему от вида материала, гранулометрического состава, метеорологических условий.

Например, при среднегодовой скорости ветра в Кривбассе интенсивность пыления отвалов составляет 0.62–0.94 мг/(с · м²), а хвостохранилищ – 0.7–2.5 мг/(с · м²) [Бересневич, Деньгуб, 2000]. При неблагоприятных метеорологических условиях на незакрепленных участках отвалов и хвостохранилищ возникают пылевые бури и пыль распространяется на десятки километров. С целью уменьшения пылевыделения применяется ряд методов. Так, в проектных решениях по развитию отвального хозяйства АО “Лебединский ГОК” предусматривается санитарно-гигиеническая рекультивация неэксплуатируемых участков отвала и мероприятия по закреплению пылящих пляжей хвостохранилища при помощи полив-оросительной техники. Однако, несмотря на актуальность проблемы пыления, большой объем научных исследований и экспериментов в этой области, в настоящее время эффективного, безопасного и дешевого способа пылеподавления на больших площадях не существует [Михайлов, Черкашенко, 2017]. Таким образом, вынос микрочастиц с поверхностей отвалов и хвостохранилищ зависит от локальных метеорологических условий, орографии местности, гранулометрического состава разрушенных горных пород и мер защиты, что, в целом, приводит к очень широкому диапазону коэффициентов выброса микрочастиц. Для оценок примем, что выбросы с поверхностей отвалов и хвостохранилищ составляют 20% от общего количества (по-видимому, это минимальное значение, которое следует учитывать).

В итоге оценка коэффициента выбросов микрочастиц при добыче угля на открытых карьерах дает следующие значения: $q_{\text{ТЧ}} = (0.048–0.1)$ кг/м³.

Зная объемы годовой добычи угля в РФ и мире можно рассчитать соответствующие им объемы $V_{\text{ГП}}$ переработанной горной породы и получить оценки массы выбросов микрочастиц на угольных разрезах. Для оценок будем считать, что удельный вес открытого способа в общей добыче составляет 75%. Данные по добыче угля в РФ приведены в табл. 2, добыча угля по странам – br.com/statisticalreview. Полученные оценки массы выбросов микрочастиц при добыче угля в мире и для двух стран – России и Китая, приведены в табл. 5. На долю Китая приходится немногим меньше половины добычи угля в мире и, соответственно, немногим меньше половины выбросов микрочастиц. Если принять выбросы микрочастиц в 2010 г. за 100%, то увеличение выбросов микрочастиц при добыче угля в мире в 2019 г. составит ≈12%, а в Китае и России – ≈19 и 36.5% соответственно.

Оценки выбросов микрочастиц при добыче угля в мире из табл. 5 находятся в пределах от 1.12 до 3.48 млн т. Полученные оценки массы выбросов микрочастиц при добыче угля открытым способом в мире близки к годовым выбросам микрочастиц от транспорта, которые по данным [IPCC, 2014] находятся в пределах от 1.1 до 3.4 млн т (по данным работы [Атмосфера, 1991] выбросы от транспорта составляют 1 млн т в год; по данным работы [Wang, 2015] эта величина также составляет ≈1 млн т в год, различие в оценках выбросов часто связано с различием подходов к учету источников выбросов и используемых моделей). Годовые выбросы авиационного и морского флота по данным [IPCC, 2014] находятся в пределах от 0.8 до 2.4 млн т. Твердые микрочастицы, которые выбрасываются в атмосферу при работе транспортных средств, относятся к категории ЧУ (сажа). Эти частицы образуются в результате неполного сгорания топлива, в их составе на углерод приходится до 99% по массе. Размеры частиц ЧУ сверху

Таблица 6. Выбросы микрочастиц ЧУ от передвижных источников в России

Годы	2012	2014	2016	2018
Передвижные источники, тыс. т	35	36	37	39
Автотранспорт, тыс. т	24	25	26	28
Железнодорожный, тыс. т	11	11	11	11

ограничиваются величиной 2.5 мкм (в аэродинамическом диаметре), но в основном – это частицы нанометрового диапазона [Anenberg et al., 2012]. В микрочастицах каменного угля, которые выбрасываются в атмосферу в процессе добычи на открытых карьерах, на долю углерода приходится 75–97% по массе, но распределение частиц по размерам включает и наноразмерные частицы [Fan, Liu, 2021]. Естественно, что химические, физические свойства, включая оптические характеристики и гранулометрический состав этих двух типов микрочастиц будут существенно отличаться. Тем не менее, микрочастицы, выбрасываемые в атмосферу при разработке открытых угольных карьеров, обладают высоким содержанием углерода и широким спектром размеров, и они, наряду с частицами ЧУ, могут оказывать влияние на радиационный баланс атмосферы в регионах их добычи, однако оценка этого влияния потребует проведения дополнительных исследований.

Выбросы ЧУ в мире по оценкам, приведенным в работе [Bond et al., 2013], составили в среднем 7500 тыс т в год в 2000 г. Оценки выбросов ЧУ на основе модели, представленной в работе [Klimont et al., 2017], дали следующие значения: 6600 тыс. т в 2000 г. и 7200 тыс. т в 2010 г. Источниками выбросов ЧУ, которые анализируются в указанных работах, являются различные процессы горения, которые сгруппированы следующим образом: транспорт, промышленность, твердое топливо для жилых помещений и открытое сжигание. Преобладающие источники выбросов черного углерода зависят от местоположения. На твердое топливо для бытовых нужд (т.е. уголь и биомасса) приходится от 60 до 80% выбросов в Азии и Африке, в то время как на дорожные и внедорожные дизельные двигатели приходится около 70% выбросов в Европе, Северной Америке и Латинской Америке. Отметим, что оценки массы выбросов микрочастиц от открытых карьеров по добыче угля сравнимы по величине с каждым из источников, составляющих суммарные выбросы ЧУ. Вне зависимости от их влияния на климатические процессы, выбросы микрочастиц от открытых угольных карьеров могут быть учтены при анализе общего аэрозольного баланса атмосферы в разделе техногенные источники.

Суммарные антропогенные выбросы ЧУ в России в 2010 г. по оценкам, приведенным в рабо-

те [Huang et al., 2015], составили 224 тыс т, при этом на выбросы от факельного сжигания газа приходится 81.1 тыс. т (36.2%), от сжигания топлива в жилом секторе – 56.0 тыс. т (25.0%), от работы транспорта – 45.5 тыс. т (20.3%), от промышленности – 29.3 тыс. т (13.1%) и электростанций – 12.1 тыс. т (5.4%). По статистическим данным [Государственный отчет..., 2019], динамика выбросов микрочастиц (в данном случае – частицы сажи или ЧУ) от передвижных источников в России приведена в табл. 6. Среднее значение массы выбросов микрочастиц при добыче угля за 2010 г. из табл. 5 составляет 94.3 тыс. т. Из сравнения полученных оценок видно, что масса выбросов микрочастиц при добыче угля открытым способом в России превосходит массу выбросов от каждого из перечисленных выше источников ЧУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значительный интерес в настоящее время представляет изучение тенденций загрязнения окружающей среды, связанных с выбросами микрочастиц от техногенных источников в процессе извлечения минерального сырья и топлива из литосферы. Анализ данных свидетельствует о том, что за последние десятилетия происходит существенное увеличение объемов добычи полезных ископаемых. Аналогичный процесс характерен и для выбросов микрочастиц от предприятий по добыче полезных ископаемых и, в частности, предприятий по добыче угля открытым способом. Следует это из полученных оценок выбросов микрочастиц при добыче угля на открытых карьерах. Динамика оценок выбросов микрочастиц при добыче угля в мире за период с 2010 по 2019 гг. показывает, что выбросы увеличились примерно на 12% по отношению к 2010 г. – это соответствует росту мировой добычи угля открытым способом. Полученные оценки выбросов микрочастиц при добыче угля открытым способом в мире очень близки к массе выбросов от автотранспорта и превосходят выбросы авиационного и морского флота, и их также следует учитывать при анализе общего аэрозольного баланса атмосферы в разделе техногенные источники.

На примере крупнейшего в России угледобывающего Кузнецкого бассейна были получены оценки выбросов микрочастиц на открытых ка-

рьерах на основе данных о пылевыведении при проведении взрывных работ и общего объема переработанной горной массы. Ежегодное потребление ВВ, применяемого для вскрышных работ и дробления угля, непрерывно растет, как растет и добыча угля. Судя по тенденции использования ВВ и росту добычи на открытых карьерах, можно ожидать, что абсолютное значение массы выбросов микрочастиц будет расти и далее. Оценки выбросов микрочастиц при добыче угля в 2019 г., по России в целом, выросли примерно на 36.5% по отношению к 2010 г. Сравнение оценок выбросов микрочастиц при добыче угля открытым способом и данных по антропогенным выбросам ЧУ в России, показывает, что масса выбросов микрочастиц при добыче угля превосходит массу выбросов от каждого из учитываемых источников ЧУ. Микрочастицы угля, выбрасываемого в атмосферу при разработке открытых карьеров, характеризуются высоким содержанием углерода, сравнимым с его содержанием в частицах ЧУ, образующегося в результате сгорания различных видов топлива, поэтому они также могут оказывать заметное влияние на радиационный баланс атмосферы в регионах их добычи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50050.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авария на АЭС “Фукусима-1”: опыт реагирования и уроки / Науч. ред. Арутюнян Р.В. Труды ИБРАЭ РАН. М.: Наука. 2013. Вып. 13. 246 с.
- Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А., Хазинс В.М.* Геоэкологические последствия проведения горных работ на карьерах с применением взрывных технологий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 2. С. 164–178.
- Адушкин В.В., Попель С.Ю.* Мелкодисперсные частицы в природных и техногенных геосистемах // Физика Земли. 2012. № 3. С. 81–92.
- 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. С. 235–244.
- Адушкин В.В., Перник Л.М., Попель С.И.* Наночастицы в опытах по разрушению скальных пород взрывом // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 2. С. 247–250.
- Атмосфера. Справочник. Л.: Гидромеоиздат. 1991. 508 с.
- Бересневич П.В., Деньгуб В.И.* Оценка загрязнения атмосферы пылью карьеров и отвалов // ГИАБ. 2000. Т. 7. С. 78–80.
- Бересневич П.В., Михайлов В.А., Филатов С.С.* Аэрология карьеров. Справочник. М.: Недра, 1990. 280 с.
- Викторов С.Д.* Взрывное разрушение массивов горных пород – основа прогресса в горном деле // ГИАБ. 2015. № S1. С. 63–75.
- Викторов С.Д., Бутысин В.С.* Образование и распространение пылегазового облака при массовом взрыве на карьере. Симпозиум “Современное горное дело, образование, наука, промышленность” М.: МГГУ. 1996. С. 119–123.
- Викторов С.Д., Гончаров С.А., Иофис М.А., Закалинский В.М.* Механика сдвижения и разрушения горных пород / Отв. ред. акад. Трубецкой К.Н. Ин-т проблем комплексного освоения недр им. акад. Н.В. Мельникова РАН. М.: РАН. 2019. 360 с.
- Виноградова А.А., Титкова Т.Б.* Черный углерод в атмосфере и альbedo подстилающей поверхности в российской арктике весной // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 1. С. 61–67.
- Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский химический журн. 2008. Т. 52. № 5. С. 112–119.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2010 году”. М. 2012. 571 с.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году”. М.: НИИ-Природа. 2018. 888 с.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году”. М.: Минприроды России, НПП “Кадастр”. 2019. 844 с.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году”. М.: Минприроды России, МГУ им. М.В. Ломоносова. 2020. 1000 с.
- Григорьев А.В., Курошев И.С.* Добыча и обогащение угля. Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий. М., СПб. 2019. С. 13–51.
- Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ. 1999. 194 с.
- Кондратьев К.Я.* Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 7. С. 565–575.
- Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). ИГД им. А.А. Скочинского. Люберцы. 1999. 46 с.
- Михайлов О.Ю., Черкащенко Н.А.* Охрана окружающей среды – приоритетное направление работы Лебединского ГОКа // Горный журн. 2017. № 5. С. 18–21.
- Михайлов В.А., Бересневич П.В., Борисов В.Г., Лобода А.И.* Борьба с пылью в рудных карьерах. М.: Недра. 1981. 262 с.
- Михайлов О.Ю., Тарасенко Я.В.* Золотой юбилей железнорудного гиганта России // Горный журн. 2017. № 5. С. 15–18.

- Мельников Н.В. Краткий справочник по открытым горным работам. М.: Недра. 1982. 414 с.
- Морозов В., Куповых Г. Теория электрических явлений в атмосфере. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. 329 с.
- Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности / Ред. Кузмич А.С. М.: Недра. 1982. 240 с.
- Опарин В.Н., Потапов В.П., Гиниятуллина О.Л., Андреева Н.В., Счастливцев Е.Л., Быков А.А. Оценка пылевого загрязнения атмосферы угледобывающих районов Кузбасса в зимний период по данным дистанционного зондирования земли // ФТПРПИ. 2014. № 3. С. 126–137.
- Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеиздат. 1992. 311 с.
- Тимофеева С.С., Мурзин М.А. Оценка экологической нагрузки технологических процессов добычи угля на окружающую среду на примере Черемховского разреза // Вестник ИрГТУ. 2015. № 3(98). С. 108–114.
- Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь–декабрь 2019 года // Уголь. 2020. № 3. С. 54–69.
<https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-3-54-69>
- Ташкинов А.С., Сысоев А.А., Ташкинов И.А., Зорина Л.А. Комплексная оценка эффективности буровзрывных и экскаваторных работ при выемке взорванных пород экскаваторами типа ЭКГ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 2(78). С. 59–65.
- Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П., Бурцев Л.И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. М.: Науктехлитиздат. 2003. 261 с.
- Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Методология оценки перспективной парадигмы развития минерально-сырьевого комплекса // ФТПРПИ. 2015. № 2. С. 177–187.
- Трубецкой К.Н., Рьльникова М.В. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке // ГИАБ. 2015. № S1-1. С. 21–32.
- 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” // Горный журн. 2017. № 5. С. 102–106.
- Anenberg S.C. et al. Global Air Quality and Health Co-benefits of Mitigating Near-Term Climate Change through Methane and Black Carbon Emission Controls // Environ. Health Perspect. 2012. V. 120. № 6. P. 831–839.
- Andreae M.O. Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels. In: A. Henderson-Sellers (Ed.). World Survey of Climatology. V. 16. Future Climates of the World, New York: Elsevier. 1995. P. 341–392.
- Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils / Eds. J. Bech, C. Bini, M.A. Pashkevich. Elsevier. 2017. 520 p.
- Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate / Eds. C. Tomasi, S. Fuzzi, A. Kokhannovsky. Wiley-VCH. 2017. 704 p.
- Bond T.C. et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 5380–5552.
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Csavina J., Field J., Taylor M.P., Song Gao, Landázuri A., Betterton E.A., Sáez A.E.A Review on the Importance of Metals and Metalloids in Atmospheric Dust and Aerosol from Mining Operations // Sci. Total Environ. 2012. V. 433. P. 58–73.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013>
- Fan L., Liu S. Respirable nano-particulate generations and their pathogenesis in mining workplaces: a review // Int. J. Coal. Sci. Technol. 2021.
<https://doi.org/10.1007/s40789-021-00412-w>
- Gautam S., Kumar P. Patra A. K. Occupational exposure to particulate matter in three Indian opencast mines // Air Qual. Atmos. Health. 2016. V. 9. P. 143–158.
<https://doi.org/10.1007/s11869-014-0311-6>
- Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // JGR: Atmospheres. 2015. V. 120. № 21. P. 11306–11333.
- Huertas J.I., Camacho D.A. Huertas M.E. Standardized emissions inventory methodology for open-pit mining areas // Environ. Sci. Pollut Res. 2012. V. 19. P. 2784–2794.
<https://doi.org/10.1007/s11356-012-0778-3>
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC. 151 p.
- Jain R.K., Cui Z., Domen J.K. Environmental Impact of Mining and Mineral Processing: Management, Monitoring, and Auditing Strategies. Elsevier. 2016. 322 p.
- Khazins V.M., Soloviev S.P. Numerical simulation of dust-gas cloud rise from explosion near Earth’s surface. Proc. SPIE 11560. 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. 2020. 115602I.
<https://doi.org/10.1117/12.2574670>
- Khazins V.M., Shuvalov V.V., Soloviev S.P. Numerical Modeling of Formation and Rise of Gas and Dust Cloud from Large Scale Commercial Blasting // Atmosphere. 2020. V. 11. № 10. P. 1112.
<https://doi.org/10.3390/atmos11101112>
- Klimont Z., Kupiainen K., Heyes C., Purohit P., Cofala J., Rafaj P., Borken-Kleefeld J., Schöpp W. Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. № 14. P. 8681–8723.
<https://doi.org/10.5194/acp-17-8681-2017>, 2017
- National Pollutant Inventory, “Emission Estimation Technique Manual for Explosives Detonation and Firing Ranges”. Environment Australia. 1999. P. 12.
- Patra A.K., Gautam G., Kumar P. Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation – A review // Environ. Technol. Innovation. 2016. V. 5. P. 233–249.

Rosen H., Novakov T., Bodhaine B.A. Soot in the Arctic // *Atmospheric Environment*. 1981. V. 15. № 8. P. 1371–1374. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(81\)90343-7](https://doi.org/10.1016/0004-6981(81)90343-7)

Rout T.K., Masto R.E., Padhy P.K. et al. Heavy metals in dusts from commercial and residential areas of Jharia coal mining town // *Environ Earth Sci*. 2015. V. 73. P. 347–359. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3429-9>

Silva J., Worsey T., Lusk B. Practical assessment of rock damage due to blasting // *Int. J. Min. Sci. Technol*. 2019. V. 29. № 3. P. 379–385.

Satheesh S.K., Moorthy K.K. Radiative effects of natural aerosols: A review // *Atmos. Environ*. 2005. V. 39. P. 2089–2110.

U. S. Environmental Protection Agency, “Review of Surface Coal Mining Emission Factors”, Emission Factor and Inventory Group, Research Triangle Park. NC 27711. July 1991.

U. S. Environmental Protection Agency, “Revision of Emission Factors for AP-42”, Section 11.9, Emission Factor and Inventory Group, Research Triangle Park, NC 27711. September 1998.

Wang R. Global Black Carbon Emissions from Motor Vehicles. Global Emission Inventory and Atmospheric Transport of Black Carbon. Springer. Berlin, Heidelberg. 2015. P. 87–99.

Zhang Z.X. Rock Fracture and Blasting. Theory and Applications. Elsevier. 2016. 528 p.

Microparticles in the Atmosphere From Lithospheric Sources of Technogenic Origin

V. V. Adushkin^{a,*} and S. P. Soloviev^{a,**}

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru*

***e-mail: soloviev@idg.chph.ras.ru*

There is a brief overview of technogenic sources of microparticles associated with the extraction of mineral raw materials and fuel from the lithosphere. The overview focuses on the emissions of rock particles during the open-pit mining process. Assessments of microparticle emission into the surface layer of the atmosphere are obtained using the example of coal mining. The analysis was carried out on the basis of data on dust emission during various technological operations in mining activities and their total volume. The obtained assessments of microparticle emissions from open-pit coal mining in the world should be taken into account when analyzing the total aerosol balance of the atmosphere in the technogenic sources section, since these assessments are very close to the mass of emissions from motor vehicles and exceed the emissions of aviation and marine fleet. The dynamics of microparticle emission assessments from coal mining in the world for the period from 2010 to 2019 show that emissions increased by about 12% compared to 2010 – this also corresponds to the growth of global open-pit coal mining.

Keywords: microparticles in the atmosphere, open-pit mining, mass industrial explosions, geoecology