ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(3):72-82
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.064 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_72

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПРОБООТБОРА ПРИ МОНИТОРИНГЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ГРАНИЦЕ САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

М.В. Волкодаева[1], Я.А. Володина[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: yana-ilyina@mail.ru

Аннотация: Объекты и предприятия минерально-сырьевого комплекса на всех стадиях своего функционирования оказывают негативное воздействие на окружающую среду, в том числе на атмосферный воздух. В соответствии с нормативно-правовыми актами для подобных источников негативного воздействия необходимо наличие санитарно-защитных зон (СЗЗ), обеспечивающих снижение влияния данных объектов на среду обитания человека до значений, установленных гигиеническими нормативами качества атмосферного воздуха, а также проведение на границе СЗЗ периодического контроля за показателями качества исследуемого объекта окружающей среды. При осуществлении контроля за химическим загрязнением атмосферного воздуха измерению содержания приоритетных загрязняющих веществ на аналитическом оборудовании часто предшествует процедура пробоотбора. С целью отбора газообразных проб применяются различные устройства: сорбционные и индикаторные трубки, поглотительные сосуды, охлаждаемые ловушки, газовые пипетки, вакуумированные канистры и другие. Большинство из них обладают определенными недостатками и в полной мере не отвечают поставленным задачам при контроле химического загрязнения воздушной среды на границе СЗЗ. Предлагается применение разработанного устройства для отбора проб атмосферного воздуха, их транспортировки и хранения, отличающегося от аналогов техническими характеристиками, позволяющими продлить срок службы пробоотборных устройств, снизить вероятность потери пробы при транспортировке, увеличить время удерживания загрязняющих веществ.

Ключевые слова: санитарно-защитная зона, минерально-сырьевой комплекс, контроль, химическое загрязнение, атмосферный воздух, отбор проб, загрязняющее вещество, пробоотборное устройство.

Для цитирования: *Волкодаева М. В., Володина Я. А.* Развитие методов пробоотбора при мониторинге атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 72–82. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_72.

Methods of sampling in atmospheric air monitoring at sanitary protection zone boundary of mines

M.V. Volkodaeva[1], Ya.A. Volodina[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: yana-ilyina@mail.ru

© М.В. Волкодаева, Я.А. Володина. 2023.

Abstract: The mineral mining facilities exert an adverse effect on the environment, including atmospheric air, within the whole period of performance. In accordance with the legal documents available for such impact sources, the sanitary protection zones should be established to reduce the influence of the mining facilities on the human habitation areas down to the hygienic standards set for the atmospheric air quality. Moreover, the periodic control over the test environmental object quality is required at the boundary of the sanitary protection zones. The control over chemical pollution of atmospheric air with measurement of concentrations of the priority pollutants on analytical equipment includes preliminary sampling. Gas sampling uses various tools: absorption and detector tubes, absorption vessels, cold traps, bulb pipettes, vacuum cans, etc. Most of these tools have disadvantages and meet incompletely the set objectives of the chemical pollution control of air at the boundary of a sanitary protection zone. The authors propose a facility for sampling, transportation and storage of atmospheric air. The performance specifications of this facility allow extending durability of sampling tools, reducing probability of sample loss in transportation and prolonging pollutant-containment time.

Key words: sanitary protection zone, mineral sector, control, chemical pollution, atmospheric air, sampling, pollutant, sampling tool.

For citation: Volkodaeva M. V., Volodina Ya. A. Methods of sampling in atmospheric air monitoring at sanitary protection zone boundary of mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(3):72-82. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_72.

Введение

Минерально-сырьевое природопользование связано с добычей, изъятием из геосистем руд металлов, угля, торфа, горючих сланцев, строительных материалов, химического сырья и т.д. Сопутствующими звеньями природопользования являются техногенные воздействия на многие компоненты природы, вызывающие их изменения [1 — 3]. Минерально-сырьевой комплекс на различных этапах его функционирования оказывает негативное воздействие на окружающую среду, в частности, являясь источником выделения в атмосферный воздух широкого перечня загрязняющих веществ [4 — 6].

В связи с вышесказанным в отношении объектов и производств минерально-сырьевого комплекса как источников воздействия на среду обитания человека [7] в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 3 марта 2018 г. № 222 «Об утверждении Правил установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон» устанавливаются санитарно-защитные зоны (СЗЗ). Размер СЗЗ варьируется в зависимости от объекта и обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух до значений, установленных гигиеническими нормативами, а в случае предприятий I и II классов опасности — также до величин приемлемого риска для здоровья населения. СЗЗ отличаются особыми условиями и режимом использования территории, в том числе предусматривают проведение периодического контроля качества среды на границе, что регулируется СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и других объектов». Критерием удовлетворительного состояния среды является отсутствие превышения предельно допустимых концентраций (ПДК)

и/или предельно допустимых уровней (ПДУ) на границе данной зоны.

С целью оценки состояния атмосферного воздуха организованы системы наблюдений [1, 8] с использованием достаточно селективных, чувствительных, стабильных, точных и надежных методов и приборов [9—11]. Тем не менее, проведение контроля связано с рядом трудностей [12 13]. Так, например, для анализа содержания многих загрязняющих веществ в атмосферном воздухе следует проводить предварительную процедуру отбора проб. При этом места отбора проб могут находиться на значительном удалении от лаборатории, в которой в дальнейшем проводится анализ. В связи с этим необходимо обеспечивать условия пробоотбора (в первую очередь, выбор подходящей тары) и транспортировки таким образом, чтобы они не оказывали влияния на состав пробы в течение времени ее доставки до места расположения стационарного аналитического оборудования.

Также предварительная процедура отбора проб может вносить значительный вклад в неопределенность результата измерений. При этом существующие подходы оценки неопределенности результата измерений рассматривают отбор пробы как источник вклада в неопределенность, но методы оценки этой составляющей разработаны недостаточно. Так, суммарная неопределенность измерений при осуществлении контроля должна включать в себя как суммарную неопределенность анализа, так и суммарную неопределенность пробоотбора. В связи с вышесказанным возникает необходимость в разработке, испытании и внедрении средств пробоотбора для контроля химического загрязнения атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны, отличающихся сочетанием конструктивных и метрологических характеристик, в совокупности позволяющих отбирать репрезентативную пробу, снижать вероятность ее потери при транспортировке, увеличивать продолжительность хранения проб, а также использовать устройство многократно.

Контроль химического воздействия на атмосферный воздух

При проведении контроля содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе измерительному процессу на аналитическом оборудовании часто предшествует процедура пробоотбора, подразумевающая не только непосредственно отбор образцов на объекте, но и их транспортировку, хранение до момента начала анализа (рис. 1).

В настоящее время для отбора газообразных проб используются разнообразные устройства: прямые сорбционные и индикаторные трубки, различные виды поглотительных сосудов (например, сосуды Зайцева, Рихтера, с пористой пластиной), охлаждаемые ловушки, шприцы, газовые пипетки, вакуумированные канистры и другие.

Среди указанных устройств наибольшее распространение получили сорбционные трубки, для которых в зависимости от программы контроля выбирается

Рис. 1. Этапы процесса контроля загрязняющих веществ в атмосферном воздухе
Fig. 1. Stages of the process of controlling pollutants in atmospheric air

соответствующий сорбент, через который затем прокачивается определенный объем воздуха. Исследуемое вещество задерживается в трубке, откуда впоследствии десорбируется нагреванием и переносится потоком инертного газа-носителя на вход в аналитическое оборудование.

Эффективность отбора проб с применением подобных трубок высока при условии, что не будет превышена сорбционная емкость сорбентов. Если сорбционная емкость превышена, то может происходить «проскок» исследуемых веществ, который не всегда удается установить. Помимо данного недостатка обращение с сорбционными трубками требует особой осторожности в связи с их хрупкостью. Предварительная подготовка сорбента является время- и трудо-затратным процессом, что усложняет процесс контроля загрязняющих веществ. Кроме того, помимо насоса для прокачки воздуха требуется дополнительное оборудование для термической десорбции.

Современной альтернативой сорбционным трубками являются специализированные пробоотборные пакеты, предназначенные для отбора газообразных проб [14, 15]. Применяются пакеты следующим образом: в пробоотборное устройство при помощи насоса закачивается проба атмосферного воздуха, после чего пакеты транспортируют до лаборатории с целью проведения качественного и количественного анализа содержания в пробах загрязняющих веществ.

Данные устройства широко используются в системах наблюдений по всему миру [16], производятся в разных странах и предназначены для разных задач [17 — 19]. Изготавливают пакеты из разнообразных материалов [20, 21] — поливинилфторида, поливинилденфторида, полиэтилентерефталата, фольгированных пленок и других материалов. Но несмотря на то, что на рынке представлен довольно широкий ассортимент пробоотборных пакетов, подходящего для контроля загрязняющих веществ в атмосферном воздухе концентраций на уровне ПДК населенных мест и ниже устройства в России не обнаружено. В связи с этим предлагается применение разработанных авторами устройств, обеспечивающих отбор репрезентативной пробы воздуха, ее транспортировку и хранение. Предлагаемые пробоотборные устройства отличаются от аналогов техническими характеристиками и возможностью их многократного использования.

Особенности разработанных пробоотборных устройств

Разработанные пробоотборные пакеты [22] представляют собой резервуар прямоугольной формы (внутренние размеры резервуара: 480 мм×305 мм, емкость 10 л при условии заполнения пакета до 80% от общего объема). По периметру устройства находятся два параллельных шва шириной около 5 мм каждый, находящиеся на расстоянии 10 мм друг от друга. Пакеты оснащены двумя противоположно расположенными по вертикальной оси в 3 см от внутренних швов фитингами (диаметр внутреннего отверстия 2 мм) с заглушками.

Пакеты изготовлены из полиэтилентерефталатовой пленки (ПЭТ-Э) высшего сорта. Выбор данного материала обусловлен его физико-химическими свойствами, прочностью, инертностью, износостойкостью, устойчивостью к действию ультрафиолета. Пленка толщиной в 50±0,003 мкм обладает следующими характеристиками: плотность — 1,4 г/см^3, прочность при разрыве составляет не менее 177 МПа, усадка — не более 3%, диапазон рабочих температур — от –50 °С до 155 °С.

Фитинги выполнены из фторопласта, поскольку данный материал обладает низким весом, инертен, тверд, прочен (предел прочности при разрыве — 260–

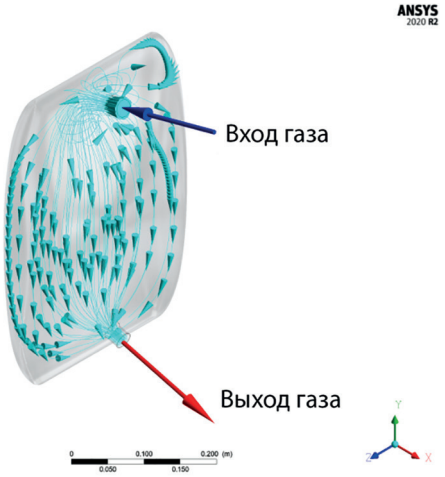

Рис. 2. Моделирование процесса очистки пакета при использовании двух фитингов
Fig. 2. Modeling the process of cleaning sample bag when using two fittings

400 кгс/см), стойкий к воде, растворителям и излучениям, является химически чистым материалом (отсутствуют примеси, появляющиеся при производстве фторполимеров). При выборе типа фторопласта, основываясь на температурном рабочем диапазоне материала, его антикоррозионных свойствах, доступности, предпочтение отдано фторопласту-4 (PTFE).

Решение о расположении фитингов у противоположных сторон обусловлено результатами моделирования, выполненного посредством программы Ansys Fluent, работа которой основана на методе конечных элементов. При использовании одного фитинга загрязняющие вещества неравномерно распределяются по резервуару, аккумулируясь в одной части пакета при закачке пробы (со скоростью 400 мл/мин). Применение двух фитингов позволяет варьировать место ввода пробы воздуха, повышает гибкость пробоотбора (возможно поочередное или одновременное использование двух входных отверстий), а также способствует лучшей регенерации устройств при сквозной продувке пакета (рис. 2).

Помимо одновременного применения двух фитингов отличительной по сравнению с аналогами особенностью устройства является использование двойных швов. Такое решение предотвращает диффузию газов через наиболее уязвимые участки пакета (швы), а также уменьшает риски потери пробы при транспортировке в случае разрыва внутреннего шва от избыточного давления пробы или деформации пакета.

Также преимуществом разработанных пробоотборных устройств по сравнению с аналогичными является увеличение сроков хранения пробы благодаря подобранной комбинации материала, его толщины, использованию двойных швов. Срок хранения пробы является важнейшей характеристикой пробоотборных устройств, поскольку точки отбора проб могут быть расположены на значительном удалении от аналитического оборудования, транспортировка до которого может занимать продолжительное время.

С целью установления времени удерживания загрязняющих веществ в разработанных пробоотборных устройствах проведены специальные исследования. В пакеты при помощи калибратора и генератора нулевого воздуха ZAG 7001 была закачена поверочная газовая смесь (стандартный образец состава искусственной газовой смеси на основе бензола, метил- и этилбензола, диметилбензолов) ГСО 10529-2014 по ТУ 2114-014-20810646-2014, после чего полученная проба напрямую из пробоотборного устройства подавалась на аналитическое оборудование (портативный газовый хроматограф ФГХ) в течение 6 сут.

Результаты экспериментов показали, что время удерживания пробы летучих органических соединений составляет 3 сут, после чего концентрация веществ начинает значительно снижаться (см. рис. 3).

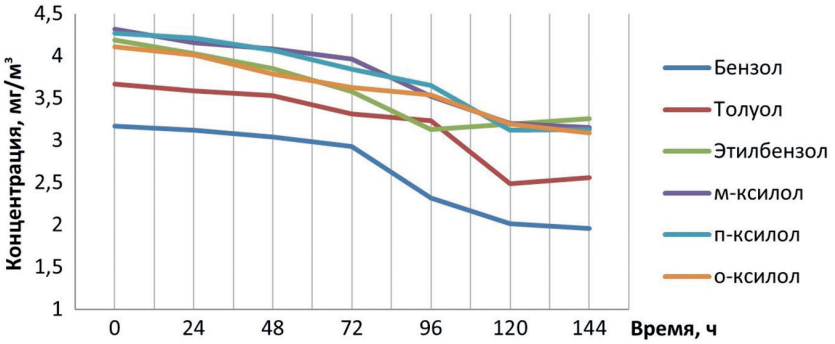

Рис. 3. Зависимость концентраций загрязняющих веществ от времени нахождения в пробоотборном пакете

Fig. 3. Bependence of concentrations of pollutants on the time of stay in sample bag

Рассчитана расширенная неопределенность результата измерений ряда летучих органических соединений в атмосферном воздухе при доверительной вероятности $P = 0{,}95$ согласно формуле:

$$U = 2\sqrt{\left(u^{o}_{пробоотбор}\right)^2 + \left(u^{o}_{анализ}\right)^2},$$

где $u^{o}_{пробоотбор}$ — суммарная стандартная неопределенность пробоотбора, одновременно учитывающая влияние случайных и известных факторов неопределенности, включающая расчет относительной стандартной неопределенности процедуры отбора пробы в пробоотборном устройстве (оценка по типу A+B), %; относительной стандартной неопределенности процедуры транспортировки пробы (оценка по типу A+B), %; относительной стандартной неопределенности процедуры хранения пробы в пробоотборном устройстве (оценка по типу A+B), %; $u^{o}_{анализ}$ — суммарная стандартная неопределенность процедуры анализа, включающая расчет относительной стандартной неопределенности анализа массовой концентрации исследуемых веществ (оценка по типу B), %; относительной стандартной неопределенности градуировочной характеристики (оценка по типу A+B), %.

В результате расчетов получено, что расширенная суммарная неопределенность результатов измерений массовой концентрации лимитирующего вещества с учетом процедуры пробоотбора составляет 21%, что удовлетворяет установленные метрологические требования к измерениям загрязняющих веществ в атмосферном воздухе согласно Постановлению Правительства РФ от 16 ноября 2020 г. № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений».

Регенерация пробоотборных устройств

Для того чтобы использовать пробоотборный пакет многократно, необходимо проводить его регенерацию (очистку). Способ регенерации должен быть выбран таким образом, чтобы минимизировать наличие в устройстве загрязняющих веществ [23]. Изначально в качестве способов регенерации авторами рассматривался нагрев пробоотборного устройства, однако из-за особенностей материала (температурного рабочего диапазона) и интенсификации физико-химических процессов при повышении температуры было принято решение данный вариант очистки не применять.

В связи с этим для очистки пакета предлагается продувать устройство воздухом с использованием инертного газа — азота особой чистоты. Благодаря потоку азота, создаваемого посредством гене-

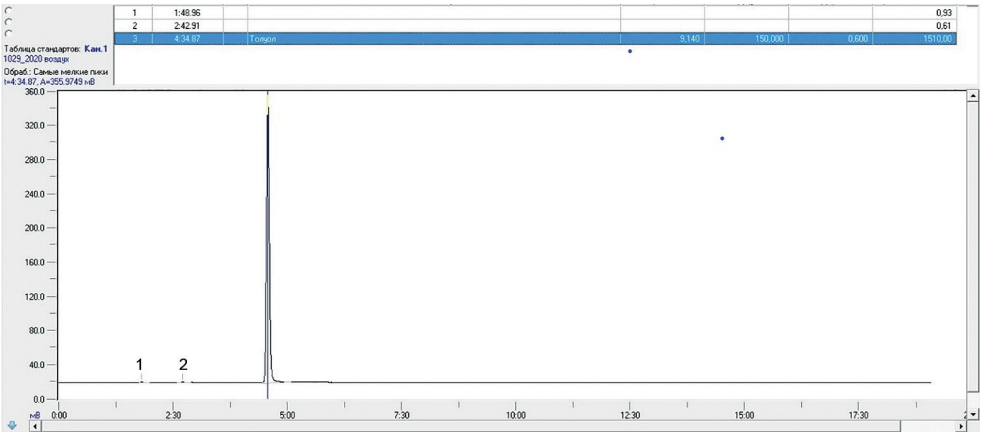

Рис. 4. Результат анализа концентраций толуола в азоте в пробоотборном пакете
Fig. 4. Result of analysis of concentrations of toluene in nitrogen in a sample bag

ратора азота, при скорости 2000 мл/мин возникает турбулентность внутри пакета, что позволяет качественно произвести очистку резервуара в течение 10 мин. Так, пробоотборный пакет из полиэтилентерефталатовой пленки при правильной регенерации имеет очень низкий фон, который не влияет на качество последующих измерений. Тем не менее, для получения достоверных данных следует вычитать измеренные фоновые значения из конечного результата исследований.

На рис. 4 изображен результат анализа (график зависимости сигнала детектора от концентрации вещества) концентраций азота с растворенным в нем толуолом концентрации 9,14 мг/м^3 в пробоотборном пакете методом газо-адсорбционной хроматографии (средство измерений — портативный газовый хроматограф ФГХ). После регенерации пакета с использованием чистого азота (рис. 5) остаточное количество летучих органических соединений составляет тысячные доли миллиграмма (от 0,5 мкг/м^3 до 5,4 мкг/м^3), что является удовлетворительным результатом регенерации устройств.

Для качественной оценки регенерации введен критерий чистоты пакетов,

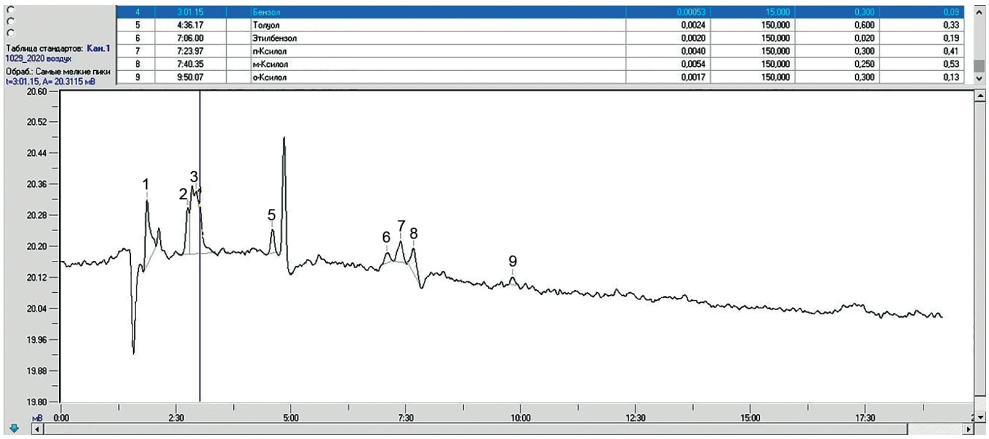

Рис. 5. Результат анализа концентрации азота в пробоотборном пакете (после регенерации)
Fig. 5. Result of analysis of concentration of nitrogen in a sample bag (after regeneration)

в зависимости от значения которого можно судить, насколько хорошо очищено устройство, нужно ли его утилизировать или можно продолжать использовать. Критерий рассчитывается для каждой методики выполнения измерений отдельно и равен разнице нижнего порога определения вещества и погрешности измерений. При превышении данного значения после трехкратной очистки пакет подлежит изъятию из оборота и направляется на переработку.

Заключение

Необходимость проведения периодического контроля химического загрязнения атмосферного воздуха, в частности на границе санитарно-защитной зоны объектов минерально-сырьевого комплекса, обуславливает постоянный поиск средств и методов натурных наблюдений, обеспечивающих оперативное получение более точной и репрезентативной экологической информации. При осуществлении натурных наблюдений за качеством воздуха установленными методами, как правило, требуется проведение процедуры пробоотбора, предусматривающей помещение образца воздуха в специализированный резервуар и последующий его анализ на стационарном оборудовании. Места отбора проб могут находиться на значительном удалении от аналитической лаборатории, что приводит к необходимости транспортировки образцов при условии сохранения их состава. Альтернативу применяемым устройствам, обладающим определенными недостатками, в том числе сорбционным трубкам, представляют пробоотборные пакеты, предназначенные для отбора, транспортировки и кратковременного хранения газообразных проб.

Предлагаемые авторами разработанные пробоотборные устройства отличаются от аналогов конструктивными характеристиками, позволяющими продлить срок службы пакетов, снизить вероятность потери пробы при транспортировке, увеличить срок удерживания загрязняющих веществ. Процесс регенерации пакетов позволяет минимизировать влияние фоновых концентраций загрязняющих веществ на пробу и, как следствие, использовать их многократно. По результатам проведенных исследований был сделан вывод о целесообразности применения разработанных пробоотборных пакетов в системах наблюдений за качеством атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны объектов минерально-сырьевого комплекса. Дальнейшие исследования в данном направлении могут стать основанием для использования предложенных устройств не только на границе санитарно-защитных зон, где должны соблюдаться нормативные требования к качеству атмосферного воздуха селитебных территорий, но также в зонах с высокими концентрациями загрязняющих веществ, в частности в непосредственной близости к источникам выбросов на объектах при добыче полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пашкевич М. А.*, *Смирнов Ю. Д.*, *Петрова Т. А.* Система экологического мониторинга атмосферного воздуха горно-промышленной агломерации // Записки Горного института. — 2013. — Т. 204. — С. 272.

2. *Strizhenok A. V.*, *Korelskiy D. S.* Estimation and reduction of methane emissions at the scheduled and repair outages of gas-compressor units // Journal of Ecological Engineering. 2019, vol. 20, no. 1, pp. 46 — 51. DOI: 10.12911/22998993/93943.

3. *Пашкевич М. А.*, *Петрова Т. А.* Создание системы производственного экологического мониторинга на предприятиях по добыче и транспортировке углеводородов Западной Сибири // Записки Горного института. – 2016. – Т. 221. – С. 737. DOI: 10.18454/pmi.2016.5.737.

4. *Boente C., Millan-Martinez M., Sánchez de la Campa A. M., Sanchez-Rodas D., de la Rosa J. D.* Physicochemical assessment of atmospheric particulate matter emissions during open-pit mining operations in a massive sulphide ore exploitation // Atmospheric Pollution Research. 2022, vol. 13, no. 4, article 101391. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101391.

5. *Volkodaeva M. V.*, *Taranina O. A.*, *Volodina Ya. A.*, *Kuznetsov V. A.* Development of industrial environmental control methods // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, article 012108. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012108.

6. *Ukaogo P. O., Ewuzie U., Onwuka C. V.* Environmental pollution: causes, effects, and the remedies / Microorganisms for Sustainable Environment and Health. 2020, pp. 419—429. DOI: 10.1016/B978-0-12-819001-2.00021-8.

7. *Parajuli R. P., Shin H. H., Maquiling A., Smith-Doiron M.* Multi-pollutant urban study on acute respiratory hospitalization and mortality attributable to ambient air pollution in Canada for 2001—2012 // Atmospheric Pollution Research. 2021, vol. 12, no. 12. DOI: 10.1016/j.apr.2021.101234.

8. *Watson N., Davies S., Wevill D.* Air monitoring: New advances in sampling and detection // Scientific World Journal. 2011, vol. 11, pp. 2582—2598. DOI: 10.1100/2011/430616.

9. *Гоголинский К. В.*, *Сясько В. А.* От неразрушающего контроля к мониторингу состояния. Тенденции развития цифровой экономики // В мире неразрушающего контроля. — 2020. — № 1(23). — С. 4—8. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-4-8.

10. *Жданеев О. В.*, *Зайцев А. В.*, *Лобанков В. М.* Метрологическое обеспечение аппаратуры для геофизических исследований // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 667—677. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.9.

11. *Sytko I. I.*, *Kremcheeva D. A.* Instrumentation for measuring the parameters and characteristics of four-poles // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017, vol. 10, no. 8, pp. 844—854.

12. *Воробьев В. Н.*, *Карлин Л. Н.*, *Потапов А. И.*, *Музалевский А. А.* Современные проблемы экологического контроля, мониторинга и управления качеством окружающей среды // Записки Горного института. — 2005. — Т. 166. — С. 100.

13. *Volkodaeva M. V.*, *Volodina Ya. A.*, *Kuznetsov V. A.* Air sample system optimization for the raw materials industry objects monitoring / Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. 2020, pp. 236—243. DOI: 10.1201/9781003164395-29.

14. *Волкодаева М. В.*, *Володина Я. А.*, *Кузнецов В. А.* О развитии методов пробоотбора при мониторинге атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны предприятий нефтегазового комплекс // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S7. — С. 404—414. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-7-404-414.

15. *Sonderfeld H.*, *White I. R.*, *Goodall I. C. A., Hopkins J. R., Lewis A. C., Koppmann R., Monks P. S.* What effect does VOC sampling time have on derived OH reactivity? // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016, vol. 16, no. 10, pp. 6303—6318. DOI: 10.5194/acp-16-6303-2016.

16. *Akdeniz N.*, *Janni K. A.*, *Jacobson L. D.*, *Hetchler B. P.* Comparison of gas sampling bags to temporarily store hydrogen sulfide, ammonia, and greenhouse gases // Transactions of the ASABE. 2011, vol. 54, no. 2, pp. 653—661. DOI: 10.13031/2013.32621.

17. *Abruzzi R. C.*, *Bonetti B., Marçal J. R. P.*, *Berenice A. D.*, *Bitencourt A. K.* Artifacts in the analysis and assessment of low-cost containers for sampling and storing greenhouse gases // Quimica Nova. 2019, vol. 42, no. 1, pp. 84—94. DOI: 10.21577/0100-4042.20170299.

18. *Kim Y.-H., Kim K.-H.* Experimental approach to assess sorptive loss properties of volatile organic compounds in the sampling bag system // Journal of Separation Science. 2012, vol. 35, no. 21, pp. 2914—2921. DOI: 10.1002/jssc.201200388.

19. *Laor Y., Ozer Y., Ravid U., Hanan A., Orenstein P.* Methodological aspects of sample collection for dynamic olfactometry // Chemical Engineering Transactions. 2010, vol. 23, pp. 55—60. DOI: 10.3303/CET1023010.

20. *Kim Y.-H., Kim K.-H., Jo S.-H., Jeon E.-C.*, *Sohn J. R.*, *Parker D. B.* Comparison of storage stability of odorous VOCs in polyester aluminum and polyvinyl fluoride Tedlar® bags // Analytica Chimica Acta. 2012, vol. 712, pp. 162—167. DOI: 10.1016/j.aca.2011.11.014.

21. *Salo H., Makinen J.* Comparison of traditional moss bags and synthetic fabric bags in magnetic monitoring of urban air pollution // Ecological Indicators. 2019, vol. 104, pp. 559–566. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.05.033.

22. *Володина Я. А., Волкодаева М. В.* Патент РФ № 199877. Устройство для отбора и транспортировки проб атмосферного воздуха. Опубл. 27.09.2020. Бюл. № 27.

23. *Коган В. Е., Шахпаронова Т. С.* Химия как основа для решения экологических проблем // Записки Горного института. – 2017. – Т. 224. – С. 223–228. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.223. РИНЦ

REFERENCES

1. Pashkevich M. A., Smirnov Yu. D., Petrova T. A. System of ecological monitoring of atmospheric air of mining industrial aglomeration. *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 204, pp. 272. [In Russ].

2. Strizhenok A. V., Korelskiy D. S. Estimation and reduction of methane emissions at the scheduled and repair outages of gas-compressor units. *Journal of Ecological Engineering*. 2019, vol. 20, no. 1, pp. 46–51. DOI: 10.12911/22998993/93943.

3. Pashkevich M. A., Petrova T. A. Creation of a system for industrial environmental monitoring in hydrocarbon producing and transporting companies of Western Siberia. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 221, pp. 737. [In Russ]. DOI: 10.18454/pmi.2016.5.737.

4. Boente C., Millan-Martinez M., Sánchez de la Campa A. M., Sanchez-Rodas D., de la Rosa J. D. Physicochemical assessment of atmospheric particulate matter emissions during open-pit mining operations in a massive sulphide ore exploitation. *Atmospheric Pollution Research*. 2022, vol. 13, no. 4, article 101391. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101391.

5. Volkodaeva M. V., Taranina O. A., Volodina Ya. A., Kuznetsov V. A. Development of industrial environmental control methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, article 012108. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012108.

6. Ukaogo P. O., Ewuzie U., Onwuka C. V. Environmental pollution: causes, effects, and the remedies. *Microorganisms for Sustainable Environment and Health*. 2020, pp. 419–429. DOI: 10.1016/B978-0-12-819001-2.00021-8.

7. Parajuli R. P., Shin H. H., Maquiling A., Smith-Doiron M. Multi-pollutant urban study on acute respiratory hospitalization and mortality attributable to ambient air pollution in Canada for 2001–2012. *Atmospheric Pollution Research*. 2021, vol. 12, no. 12, article 101234. DOI: 10.1016/j.apr.2021.101234.

8. Watson N., Davies S., Wevill D. Air monitoring: New advances in sampling and detection. *Scientific World Journal*. 2011, vol. 11, pp. 2582–2598. DOI: 10.1100/2011/430616.

9. Gogolinskiy K. V., Syasko V. A. From NDT to condition monitoring. Development trends in digital economy. *NDT World Review*. 2020, no. 1(23), pp. 4–8. [In Russ]. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-4-8.

10. Zhdaneev O. V., Zaitsev A. V., Lobankov V. M. Metrological support of equipment for geophysical research. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 667–677. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.9.

11. Sytko I. I., Kremcheeva D. A. Instrumentation for measuring the parameters and characteristics of four-poles. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017, vol. 10, no. 8, pp. 844–854.

12. Vorobev V. N., Karlin L. N., Potapov A. I., Muzalevskii A. A. Modern problems of environmental control, monitoring and environmental quality management. *Journal of Mining Institute*. 2005, vol. 166, pp. 100. [In Russ].

13. Volkodaeva M. V., Volodina Ya. A., Kuznetsov V. A. Air sample system optimization for the raw materials industry objects monitoring. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. 2020, pp. 236–243. DOI: 10.1201/9781003164395-29.

14. Volkodaeva M. V., Volodina Ya. A., Kuznetsov V. A. On the development of sampling methods during the ambient air monitoring at the edge of the sanitary protection zone of oil and gas industry enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. S7, pp. 404 — 414. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-7-404-414.

15. Sonderfeld H., White I. R., Goodall I. C. A., Hopkins J. R., Lewis A. C., Koppmann R., Monks P. S. What effect does VOC sampling time have on derived OH reactivity? *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016, vol. 16, no. 10, pp. 6303 — 6318. DOI: 10.5194/acp-16-6303-2016.

16. Akdeniz N., Janni K. A., Jacobson L. D., Hetchler B. P. Comparison of gas sampling bags to temporarily store hydrogen sulfide, ammonia, and greenhouse gases. *Transactions of the ASABE*. 2011, vol. 54, no. 2, pp. 653 — 661. DOI: 10.13031/2013.32621.

17. Abruzzi R. C., Bonetti B., Marçal J. R. P., Berenice A. D., Bitencourt A. K. Artifacts in the analysis and assessment of low-cost containers for sampling and storing greenhouse gases. *Quimica Nova*. 2019, vol. 42, no. 1, pp. 84 — 94. DOI: 10.21577/0100-4042.20170299.

18. Kim Y.-H., Kim K.-H. Experimental approach to assess sorptive loss properties of volatile organic compounds in the sampling bag system. *Journal of Separation Science*. 2012, vol. 35, no. 21, pp. 2914 — 2921. DOI: 10.1002/jssc.201200388.

19. Laor Y., Ozer Y., Ravid U., Hanan A., Orenstein P. Methodological aspects of sample collection for dynamic olfactometry. *Chemical Engineering Transactions*. 2010, vol. 23, pp. 55 — 60. DOI: 10.3303/CET1023010.

20. Kim Y.-H., Kim K.-H., Jo S.-H., Jeon E.-C., Sohn J. R., Parker D. B. Comparison of storage stability of odorous VOCs in polyester aluminum and polyvinyl fluoride Tedlar® bags. *Analytica Chimica Acta*. 2012, vol. 712, pp. 162 — 167. DOI: 10.1016/j.aca.2011.11.014.

21. Salo H., Makinen J. Comparison of traditional moss bags and synthetic fabric bags in magnetic monitoring of urban air pollution. *Ecological Indicators*. 2019, vol. 104, pp. 559 — 566. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.05.033.

22. Volodina Ya. A., Volkodaeva M. V. *Patent RU 199877*. 27.09.2020. [In Russ].

23. Kogan V. E., Shakhparonova T. S. Chemistry as a basis for solving environmental issues. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 224, pp. 223 — 228. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.223.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волкодаева Марина Владимировна[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: volkodaeva_mv@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0463-1622,
Володина Яна Александровна[1] — аспирант,
e-mail: yana-ilyina@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7197-0854,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Володина Я.А., e-mail: yana-ilyina@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.V. Volkodaeva[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: volkodaeva_mv@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0463-1622,
Ya.A. Volodina[1], Graduate Student, e-mail: yana-ilyina@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7197-0854,
[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, 199106, Russia.
Corresponding author: Ya.A. Volodina, e-mail: yana-ilyina@mail.ru.

Получена редакцией 27.09.2022; получена после рецензии 28.01.2023; принята к печати 10.02.2023.
Received by the editors 27.09.2022; received after the review 28.01.2023; accepted for printing 10.02.2023.