

Совершенствование процедуры определения бис(2-хлорэтил)сульфида в материалах с высокой сорбционной активностью

***М.Д. Шачнева, Н.Л. Корягина, Е.И. Савельева**

*НИИ гигиены, профпатологии и экологии человека
Федерального медико-биологического агентства России,
188663, Ленинградская область, Всеволожский район, г.п. Кузьмоловский,
ст. Капитолово, Российская Федерация*

*Адрес для переписки: Шачнева Мария Дмитриевна, E-mail: shachneva_mariya@mail.ru

Поступила в редакцию 19 марта 2021 г., после исправления – 12 апреля 2021 г.

Разработана унифицированная высокочувствительная высокоселективная и экспрессная процедура определения бис(2-хлорэтил)сульфида (сернистого иприта) в образцах с высокой сорбционной активностью методом газовой хроматографии с tandemным масс-селективным детектированием (ГХ-МС/МС). Процедура основана на экстракции бис(2-хлорэтил)сульфида из матрицы и концентрировании экстракта в токе азота до 0.2 мл с последующим анализом методом ГХ-МС/МС. В качестве объектов анализа исследованы керамическая плитка, бетон, различные виды кирпича и полимеров. Предел определения иприта в разных матрицах составил 0.7-0.9 нг/г (0.007-0.009 ПДК). Изучена эффективность пяти экстрагентов (диэтилового эфира, 2-хлорпропана, ацетонитрила, гексана и ацетона) для извлечения аналита из матриц различной природы. Показано, что для извлечения бис(2-хлорэтил)сульфида из впитывающих материалов оптимальным экстрагентом является 2-хлорпропан. Исследована стабильность бис(2-хлорэтил)сульфида в составе впитывающих материалов в процессе длительного хранения. Показано, что в образцах на основе бетона после пяти месяцев хранения при температуре 4 °С остаточное содержание бис(2-хлорэтил)сульфида ниже предела обнаружения методики, в то время как в полимерных материалах в этих же условиях хранения содержание бис(2-хлорэтил)сульфида практически не менялось. Проведена апробация методики на образцах строительных материалов, отобранных при мониторинге бывшего объекта по уничтожению химического оружия на этапе конверсии.

Ключевые слова: бис(2-хлорэтил)сульфид, сернистый иприт, строительные материалы, газовая хроматография, tandemное масс-селективное детектирование.

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2021, vol. 25, no. 2, pp. 110-116

DOI: 10.15826/analitika.2021.25.2.004

Improvement of the procedure for bis(2-chloroethyl)sulfide determination in matrices with high sorption activity

***M.D. Shachneva, N.L. Koryagina, E.I. Savelieva**

*Research Institute of Hygiene, Occupational Pathology and Human Ecology
Federal State Unitary Enterprise, Federal Medical Biological Agency,
g/p Kuz'molovsky, Vsevolozhsky District, Leningrad Region, 188663,
Russian Federation*

*Corresponding author: Mariya D. Shachneva, E-mail: shachneva_mariya@mail.ru

Submitted 19 March 2021, received in revised form 12 April 2021

A rapid, unified, highly sensitive and selective procedure for bis(2-chloroethyl)sulfide (sulfur mustard, SM) determination in matrices with high sorption activity using gas chromatography-tandem mass-spectrometry (GC-MS/MS) was developed. Ceramic tile, concrete, various types of bricks and polymers were studied as objects of the analysis. The parameters for the GC-MS/MS determination of SM were optimized. The efficiency

of five solvents (diethyl ether, 2-chloropropane, acetonitrile, hexane, and acetone) for the extraction of SM from the various matrices was studied. 2-chloropropane was the extraction solvent of choice. The developed procedure is based on the extraction of SM from the matrix and the concentration of the extract under the stream of nitrogen to 0.2 mL followed by GC-MS/MS analysis. The LODs for SM in all investigated matrices were 0.7-0.9 ng/g (0.007-0.009 MPC). The long-term stability of SM in various materials was studied. It was shown that in brick, concrete and ceramic samples the residual amount of SM after five months of storage at 4°C was below the LOD of the method, while in polymer samples under the same storage condition the amount of SM has not changed significantly. The developed procedure has been applied to the analysis of samples from the former chemical weapons destruction facility.

Key words: bis(2-chloroethyl)sulfide, sulfur mustard, construction materials, gas chromatography, tandem mass-spectrometry

ВВЕДЕНИЕ

Бис(2-хлорэтил)сульфид (сернистый иприт, далее иприт, CAS 505-60-2) относится к персистентным отравляющим веществам (**ОВ**) [1]. Иприт легко сорбируется на впитывающих пористых поверхностях, сохраняя при этом свою токсичность. Известны поражения людей ипритом после вскрытия мест захоронения через 30-50 лет [2, 3]. В 1962 и 1970 гг. в Японии были зарегистрированы случаи поражения затопленным на мелководье после второй мировой войны ипритом [4]. Низкая растворимость в воде и незначительное давление насыщенного пара приводят к тому, что иприт достаточно медленно гидролизуеться и испаряется, и, таким образом, способен аккумулироваться на поверхностях и являться потенциальным источником опасности.

В рамках выполнения программы по уничтожению химического оружия (**УХО**) в Российской Федерации, ликвидация запасов иприта, как и других отравляющих веществ, производилась непосредственно на местах их производства и хранения. Результатом деятельности бывших предприятий по УХО явилось накопление большого количества отходов (строительные отходы, технологические установки, элементы производственной инфраструктуры). После завершения процесса уничтожения химического оружия (**ХО**) встал вопрос о возможности вовлечения в хозяйственный оборот использованных производственных мощностей. Для контроля безопасности предполагаемых объектов перепрофилирования их необходимо исследовать на присутствие остаточных количеств отравляющих веществ.

Известно, что *бис*(2-хлорэтил)сульфид, ввиду его способности к самокапсулированию, долго сохраняется в различных материалах, в особенности обладающих сорбционной активностью. Химико-аналитический контроль в процессе УХО и при выводе объектов УХО из эксплуатации проводился по аттестованным методикам измерений, позволяющим контролировать токсиканты на уровне установленных гигиенических нормативов. В то же время, на этапе перепрофилирования объектов по УХО возникла задача контроля содержания иприта в матрицах, методики измерений для которых не были разработаны.

При разработке методик нового поколения для определения иприта на поверхностях и в глубинных слоях материалов важно было достичь существенно более низких по сравнению с порогом токсического действия пределов обнаружения, поскольку на этапе перепрофилирования объектов к ним предъявляются более жесткие стандарты безопасности, чем к действующим объектам УХО. Важным требованием к методикам является высокая производительность, поскольку количество образцов для анализа исчисляется сотнями.

Целью настоящей работы являлось совершенствование процедуры определения *бис*(2-хлорэтил)сульфида в материалах с высокой сорбционной активностью (цемент, кирпич, керамическая плитка, полимерные материалы, резина).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы

Сернистый иприт (ГСО 8248-2003), 2-хлорпропан (Sigma Aldrich, кат. № С68563), ацетонитрил (ТУ 2634-002-54260861-2013), ацетон (ГОСТ 2603-79), диэтиловый эфир (ТУ 2600-001-43852015-10), гексан (ТУ 2631-158-44493179-13), смесь n-алканов C5-C24 (Supelco, кат. № 500631).

Объекты исследования

Объектами исследований являлись образцы строительных материалов и полимерных элементов инфраструктуры: керамическая плитка, бетон, огнеупорный, керамический и силикатный кирпич, образцы кабель-канала из поливинилхлорида (полимер № 1), уплотняющей прокладки на основе резины (полимер № 2), гофры для кабеля из поливинилхлорида (полимер № 3).

Модельные образцы с внесением иприта

К навескам измельченного материала массой 1 г, заведомо не содержащих иприт, добавляли по 200 мкл раствора сернистого иприта в диэтиловом эфире для достижения концентраций 0.5-50 нг/г. Образцы тщательно перемешивали и выдерживали при комнатной температуре перед анализом в течение 12 ч.

Набор модельных образцов с концентрацией иприта 50 нг/г также хранили в герметичной упаковке в течение 5 месяцев при температуре 4 °С.

Подготовка проб к анализу

К навеске измельченного гомогенизированного твердого материала массой 1 г добавляли 4 мл 2-хлорпропана и подвергали ультразвуковому воздействию в течение 5 мин. Надсадочную жидкость переносили в центрифужную пробирку вместимостью 10 мл и повторяли процедуру экстракции еще раз. Органические экстракты объединяли, центрифугировали в течение 10 мин при 2000 об/мин и концентрировали в токе азота при комнатной температуре до конечного объема 200 мкл. Аликвоту экстракта объемом 2 мкл анализировали методом ГХ-МС/МС.

Оборудование

Анализ методом газовой хроматографии с tandemным масс-селективным детектированием (ГХ-МС/МС) осуществляли на газовом хроматографе модели 7890А с масс-селективным детектором с тройным квадруполем модели 7000 фирмы Agilent. Хроматографическое разделение компонентов проводили на капиллярной кварцевой колонке HP-5MS длиной 30 м, внутренним диаметром 0.25 мм и толщиной неподвижной фазы 0.25 мкм производства фирмы Agilent Technologies.

Условия ГХ-МС/МС анализа

Хроматографическое разделение: температура инжектора 270 °С; ввод пробы без деления потока; температурная программа: начальная температура колонки 40 °С, подъем температуры со скоростью 10 °С/мин до 280 °С; газ-носитель: гелий, расход газа-носителя через колонку 1 мл/мин.

Масс-спектрометрический анализ: энергия ионизирующих электронов 70 эВ, температура источника ионов 230 °С, температура интерфейса 280 °С, режим детектирования – мониторинг множественных реакций (ММР).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сернистый иприт является наиболее известным ОВ кожно-нарывного действия, и механизм его трансформации в объектах окружающей среды и биосредах достаточно хорошо изучен [1]. В то же время, процедур определения содержания иприта в материалах с высокой сорбционной активностью в доступной печати было найдено ограниченное количество. Показано, что традиционная практика пробоотбора, основанная на взятии смывов с поверхностей, эффективна только для непористых материалов. В работе [5] предложено в качестве экстрагирующего материала использовать жидкий латекс, который наносят на исследуемую поверх-

ность. В процессе высыхания латекса происходит десорбция иприта с исследуемой поверхности в латекс. Экстракцию иприта из латекса проводили смесью метанол/ацетон (3 : 7). Сравнение стандартной техники взятия смывов смесью 10 % изопропанола в дихлорметане и техники пробоотбора с использованием латекса с девяти разных по структуре поверхностей не выявило особенных преимуществ предложенного авторами способа извлечения иприта. Степень извлечения способом взятия смывов с поверхности глазурованной плитки составила 49.7 %, нержавеющей стали – 21.2 %, а в экстрактах, полученных после обработки латексом гладкого цемента и керамической плитки – 35.2 % и 16.7 % соответственно. Степень извлечения с других поверхностей не превышала 10.0 % при использовании разных способов отбора проб. Приведенные данные свидетельствуют о том, что контроль загрязненности строительных материалов ипритом путем взятия смывов с поверхностей малоэффективен. Кроме того, при анализе проб, загрязненных различными органическими соединениями, в том числе поверхностно-активными веществами и другими компонентами дегазирующих рецептур, возникает проблема преодоления матричного эффекта.

Низкие степени извлечения иприта с поверхностей материалов и мешающее влияние матричных компонентов на результаты анализа при реализации метода ГХ-МС продемонстрированы в ряде публикаций [6-8]. Особенно остро проблема матричного эффекта проявляется при анализе полимерных материалов. В работе [6] определение иприта осуществляли в образцах резины (каучука) и металлических пластин, покрытых тонким слоем алкидной краски, методом ГХ-МС после экстракции хлористым метиленом, а также методом ГХ-МС в сочетании с динамическим парофазным анализом (ПФА). Высококипящие углеводороды, используемые в качестве пластификаторов в производстве каучука, негативно влияли на хроматографическое разделение, что приводило к уширению полосы пика иприта и резкому снижению разрешения. Снизить мешающее влияние матричных компонентов удалось при использовании метода динамического ПФА. К недостаткам динамического ПФА относятся трудности, связанные с обеспечением удовлетворительной воспроизводимости результатов и необходимость использования специального оборудования.

Разработку и совершенствование процедуры определения иприта в материалах с высокой сорбционной активностью в режиме целевого анализа проводили по следующим направлениям:

- разработка унифицированного для разных матриц с пористой текстурой режима пробоподготовки для достижения максимальной степени извлечения иприта;
- снижение негативного влияния матричных компонентов путем использования оборудова-

Таблица 1

Масс-спектральные и хроматографические характеристики иприта при реализации метода ГХ-МС/МС

Table 1

Parameters for the determination of sulfur mustard

Аналит	ЭИ [70 эВ, m/z 40-200, $I_{отн} \geq 10\%$]	ММП-переход	Энергия столкновений, эВ	RT, мин
Сернистый иприт	109 (100 %), 111 (37 %), 158 (27 %), 63 (13 %)	109 → 63 158 → 109	6 3	9.2

Примечание: ЭИ – электронная ионизация

ния с тандемным масс-спектрометрическим детектированием;

- апробация процедуры определения иприта в образцах пористых материалов, содержащих искусственные добавки аналита;
- оценка стабильности иприта в образцах пористых материалов в условиях длительного хранения;
- апробация разработанной методики на образцах материалов, доставленных с объекта УХО.

Выбор хроматомасс-спектрометрических параметров для анализа иприта

Для подбора оптимальных условий хроматографического разделения и масс-спектрометрического детектирования был проанализирован стандартный раствор иприта в 2-хлорпропане с концентрацией 5 мкг/мл методом ГХ-МС в режиме сканирования по полному ионному току в диапазоне соотношений массы к заряду m/z 40-200. Для наиболее интенсивных ионов, выбранных из полученного масс-спектра, с m/z 158 и m/z 109, были зарегистрированы масс-спектры диссоциации, индуцированной соударениями, в диапазоне энергий от 3 до 12 эВ с шагом 3 эВ. В качестве оптимальной энергии соударения была выбрана величина, при которой была получена максимальная интенсивность аналитического сигнала (площадь пика).

В табл. 1 представлены хроматографические и масс-спектральные характеристики иприта. Линейный индекс удерживания (RI) иприта был рассчитан при анализе стандартного раствора иприта с внесением смеси *n*-алканов C5-C24 в режиме сканирования по полному ионному току в диапазоне m/z от 45 до 250. Величина RI на слабополярной фазе (HP-5) составила 1178 ± 2 ед. инд.

Выбор оптимального экстрагента

Влияние экстрагентов на исследуемые матрицы. Экстракцию иприта из образцов проводили методом жидкостной экстракции. Выбор экстрагентов для дальнейших исследований осуществляли, исходя не только из их селективности к аналиту и экстрагирующей способности, а также, учитывая особенности матрицы проб. Полимеры, как известно, хорошо растворяются в большинстве хлорсодержащих органических растворителей. Исследуемые полимерные элементы инфраструктуры растворялись в дихлорметане, дихлорэтаноле и хлороформе. Оптимальным для целей настоящей работы хлорсодержащим растворителем оказался 2-хлорпропан. Также было проверено влияния на матрицу диэтилового эфира, ацетонитрила, гексана и ацетона (только для образцов бетона, плитки и кирпичей).

Определение степени извлечения иприта из образцов промышленных материалов. Степень извлечения иприта из образцов пористых

Таблица 2

Степени извлечения иприта из модельных образцов разными растворителями

Table 2

Recoveries of sulfur mustard from the model samples with various solvents

Объект анализа	Степень извлечения, % (коэффициент вариации, %; $n = 3$)				
	Диэтиловый эфир	2-хлорпропан	Ацетонитрил	Гексан	Ацетон
Керамическая плитка	н/о	63 (20)	50 (30)	37 (8)	68 (9)
Огнеупорный кирпич		66 (2)	59 (3)	37 (11)	33 (9)
Керамический кирпич	49 (6)	62 (10)	42 (20)	34 (8)	27 (14)
Силикатный кирпич	69 (5)	50 (13)	30 (30)	34 (18)	22 (17)
Бетон	86 (14)	56 (30)	43 (25)	52 (14)	52 (11)
Полимер №1	67 (7)	77 (19)	36 (27)	36 (10)	н/и
Полимер №2	60 (30)	92 (11)	100 (8)	78 (13)	
Полимер №3	48 (27)	100 (4)	57 (16)	30 (6)	

Примечания: н/о – не обнаружено, концентрация аналита в экстракте ниже предела обнаружения; н/и – не исследовалось, степень извлечения иприта ацетоном из образцов полимеров не исследовалась

материалов определяли путем сравнения отклика детектора после анализа экстракта измельченного образца, в который предварительно вносили иприт в концентрации 50 нг/г (0.5 ПДК), и анализа раствора стандарта состава определяемого соединения такой же концентрации. Результаты определения величин степени извлечения представлены в табл. 2.

Для исследованных матриц получились различные значения степени извлечения. Лучше всего иприт извлекается диэтиловым эфиром из бетона (90 %), ацетонитрилом из полимера № 2 (100 %), а также 2-хлорпропаном из всех образцов полимеров (80-100 %).

Степень извлечения ацетоном исследовалась только на образцах плитки, бетона и кирпичей ввиду частичной растворимости полимеров в ацетоне. Степень извлечения иприта из образцов плитки и бетона была установлена на уровне 50-70 %, из образцов кирпичей – менее 35 %.

Гексаном иприт наиболее полно извлекался из полимера № 2 (80 %) и бетона (50 %). Для всех остальных матриц средняя эффективность экстракции гексаном составила менее 40 %.

Степень извлечения иприта ацетонитрилом также была разной для всех образцов. В среднем – 30-60 %, за исключением полимера № 2 (100 %).

Степень извлечения диэтиловым эфиром из всех матриц, кроме бетона, находилась в диапазоне 50-70 %. Однако при анализе экстрактов из керамической плитки и огнеупорного кирпича иприт обнаружен не был.

Максимальную экстрагирующую способность при извлечении иприта из объектов различного матричного состава показал 2-хлорпропан. Для бетона и силикатного кирпича степень извлечения составила 50-60 %, для всех остальных матриц – 60-100 %.

Матричный эффект

Для оценки матричного влияния были приготовлены экстракты 2-хлорпропаном из всех исследуемых бланковых модельных образцов, не

содержащих иприт. В экстракты вносили иприт и анализировали методом ГХ-МС/МС. Матричный фактор (МФ) оценивали, сравнивая отклик иприта в чистом растворителе с откликом аналита, добавленного в экстракт из бланковых матриц. Было установлено, что исследуемые матрицы не оказывают значительного влияния на аналитический сигнал иприта (МФ = 90-110 %). Незначительное подавление сигнала наблюдали при анализе экстракта из образца керамической плитки (МФ = 80 %) и усиление сигнала при анализе экстракта из образца полимера № 3 (МФ = 126 %).

Оценка селективности процедуры

Селективность процедуры оценивали путем анализа методом ГХ-МС/МС экстрактов, приготовленных из строительных материалов, не содержащих иприт. На профиле хроматограмм, реконструированных по характеристичным для иприта ММП-переходам, посторонние сигналы коэлюируемых матричных соединений с временем удерживания 9.2 ± 0.1 мин отсутствовали.

Линейный диапазон детектирования

Линейный диапазон детектирования устанавливали при анализе серии стандартных растворов в диапазоне концентраций от 0.5 до 300 нг иприта, внесенных в 200 мкл 2-хлорпропана (2.5-1500 нг/мл). Уравнение линейной регрессии $S = 55.504 \times c - 277.72$; коэффициент детерминации $R^2 = 0.9939$ ($n = 9$). Предел детектирования иприта составляет 2.5 нг/мл.

Критерии идентификации

Критерием надежной идентификации являлось детектирование сигналов с соотношением сигнал : шум не менее 3 : 1 при времени удерживания, совпадающим в пределах ± 0.1 мин со временем удерживания, установленным для стандартного образца состава иприта, а также совпадение соотно-

Таблица 3

Метрологические характеристики методики определения иприта в образцах строительных материалов

Table 3

Validation parameters of the method for determination of sulfur mustard in construction materials

Объект анализа	ПО, нг/г	ПКО, нг/г	КВ (1 день), % n=3	КВ (3 дня), % n=9
Керамическая плитка	0.8	2.0	9.9	2.6
Огнеупорный кирпич	0.8	2.0	13.9	3.3
Керамический кирпич	0.9	3.0	3.1	9.8
Силикатный кирпич	0.9	3.0	21.6	4.6
Бетон	0.8	2.0	22.9	7.4
Полимер № 1	0.9	2.0	10.8	1.6
Полимер № 2	0.7	2.0	13.4	6.4
Полимер № 3	0.8	2.0	4.4	8.8

Примечания: ПО – предел обнаружения; ПКО – предел количественного определения; КВ – коэффициент вариации.

шений характеристичных переходов в масс-спектре определяемого соединения в исследуемом образце и стандартном растворе.

Установленные характеристики методики

В табл. 3 представлены метрологические характеристики методики анализа. Предел обнаружения методики определяли как минимальную концентрацию аналита в образцах строительных конструкций и инженерной инфраструктуры, при которой был зарегистрирован хроматографический пик с соотношением сигнал : шум не менее 3 : 1. Предел обнаружения в разных матрицах составил 0.007-0.009 ПДК.

Пределом количественного определения иприта считали минимальную концентрацию, при которой был зарегистрирован хроматографический пик иприта с соотношением сигнал : шум более 10 : 1. Предел количественного определения в разных матрицах составил 0.02-0.03 ПДК.

Воспроизводимость результатов в течение одного дня оценивали по результатам анализа трех параллельных образцов каждой исследуемой матрицы с внесением иприта. Воспроизводимость в разные дни оценивали по результатам анализа трех параллельных образцов с внесением иприта в течение трех дней.

Исследование долгосрочной стабильности образцов с внесением иприта

Оптимизированные условия пробоподготовки и ГХ-МС/МС анализа были применены для исследования стабильности образцов с внесением иприта в концентрации 50 нг/г после хранения в течение 5 месяцев при температуре 4 °С. В результате исследования в образцах кирпичей и бетона иприт обнаружен не был; в образце керамической плитки иприт детектирован на уровне предела обнаружения. В образцах полимеров № 1, № 2 и № 3 иприт был обнаружен на уровне 27.0 нг/г, 42.0 нг/г и 34.4 нг/г соответственно.

Полученные данные не противоречат результатам, опубликованным в литературных источниках. Содержание иприта в образцах резины после хранения в течение 30 мин, 3-х недель и 6-ти месяцев при комнатной температуре составило 86 %, 60 % и 50 % соответственно. Степень извлечения иприта из образцов краски была ниже [6].

Стабильность иприта в образцах бетона была исследована методами ГХ-МС и ЯМР в работе [7]. Методом ГХ-МС содержание иприта в образцах бетона через 1 час после приготовления модельного образца составляло 90 %, через сутки – 40 %, через 8 дней – только 5 % от внесенного количества, тогда как исследование методом ЯМР-спектроскопии измельченных образцов не показало снижения содержания иприта в пробах в процессе хранения. По мнению авторов, иприт присутствует в бетоне до

его разложения в неэкстрагируемой форме, и, таким образом, представляет потенциальную опасность для окружающей среды.

На основании литературных данных и результатов собственных исследований установлено, что полимерные материалы, такие как резина, краска, ПВХ наиболее пригодны для ретроспективной идентификации иприта в объектах, контактировавших ранее с ОБ.

Апробация методики определения иприта при анализе образцов, полученных с объекта по УХО

Разработанная методика была апробирована при анализе реальных проб с бывшего объекта по УХО. Иприт был обнаружен в семи пробах (образцы полимерных материалов) на уровне 0.07-0.5 ПДК. Соотношение интенсивностей сигналов характеристичных ММР-переходов иприта (с соотношением сигнал : шум не менее 3 : 1) удовлетворяло критерию достоверной идентификации. Результаты исследований были учтены при решении вопроса о сохранении/утилизации технологического оборудования и элементов производственной инфраструктуры объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана простая, экспрессная и высокоселективная процедура определения бис(2-хлорэтил)сульфида (сернистого иприта) в образцах с высокой сорбционной активностью методом ГХ-МС/МС. Достигнутые пределы обнаружения позволяют определять иприт в концентрациях на два порядка ниже ПДК. Учитывая большое количество отходов, образующихся в процессе УХО и способность иприта сорбироваться на пористых полимерных покрытиях, актуальным является контроль содержания этого чрезвычайно токсичного соединения на уровне значительно ниже ПДК для экологически безопасного обращения с отходами производства.

Проведенные исследования показали, что после внесения иприта в концентрации 50 нг/г и последующего хранения в течение 5 месяцев остаточное содержание иприта в образцах бетона находится на уровне ниже 0.8 нг/г (0.008 ПДК), что может быть свидетельством как необратимой сорбции определяемого соединения матрицей, так и практически полной деструкции токсиканта, вероятно, вследствие гидролиза в щелочной среде.

Показано, что содержание иприта в образцах полимерных материалов снижается менее, чем на 50 % при хранении в течение полугода. В полимерных матрицах иприт остался практически в неизменном виде, и, таким образом, полимерные материалы, которые находились в контакте с ОБ, являются источником потенциальной опасности для объектов окружающей среды и, в то же время,

наиболее перспективными объектами ретроспективного анализа.

Проведена успешная апробация методики при анализе проб с бывшего объекта по УХО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Munro N. B., Talmage S. S., Griffin G. D., Waters L. C., Watson A. P., King J. F., Hauschild V. The sources, fate and toxicity of chemical warfare agent degradation products // *Environmental Health Perspectives*. 1999. V. 107, № 12. P. 933-974.
2. Small M.J. TR-8208 (AD-B077 091) Fort Detrick, MD: US Army Med.Res.Devel.Command., 1983.
3. Summary report on a data base for predicting consequences of chemical disposal operations, ESAP 1200-12, Headquarters, Edgewood Arsenal, Aberdeen Proving Ground, Md.,1973.
4. Kurata H. *Chemical weapons: destruction and conversion*. London, Taylor and Francis. 1980. 201 p.
5. Hernon-Kenny L.A., Behringer D.L., Crenshaw M.D. Comparison of latex body paint with wetted gauze wipes for sampling the chemical warfare agents VX and sulfur mustard from common indoor surfaces // *Forensic Science International*. 2016. V. 262. P. 143-149.
6. Wils E.R.J., Hulst A.G., de Jong A.L. Determination of mustard gas and related vesicants in rubber and paint by gas chromatography-mass spectrometry // *Journal of Chromatography*. 1992. V. 625. P. 382-386.
7. Brevett C.A.S., Sumpter K.B., Wagner G.W., Rice J.S. Degradation of the blister agent sulfur mustard, bis(2-chloroethyl) sulfide, on concrete // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. V. 140. P. 353-360.
8. Mizrahi D.M., Goldvaser M., Columbus I. Long-term evaluation of the fate of sulfur mustard on dry and humid soils, asphalt, and concrete // *Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 45. P. 3466–3472.

REFERENCES

1. Munro N. B., Talmage S. S., Griffin G. D., Waters L. C., Watson A. P., King J. F., Hauschild V. The sources, fate and toxicity of chemical warfare agent degradation products. *Environmental Health Perspectives*, 1999, vol. 107. no 12, pp. 933-974. doi:10.1289/ehp.99107933
2. Small M.J. TR-8208 (AD-B077 091) Fort Detrick, MD: US Army Med.Res.Devel.Command., 1983.
3. *Summary report on a data base for predicting consequences of chemical disposal operations, ESAP 1200-12*, Headquarters, Edgewood Arsenal, Aberdeen Proving Ground, Md.,1973.
4. Kurata H. *Chemical weapons: destruction and conversion*. London, Taylor and Francis, 1980, 201 p..
5. Hernon-Kenny L. A., Behringer D. L., Crenshaw M. D. Comparison of latex body paint with wetted gauze wipes for sampling the chemical warfare agents VX and sulfur mustard from common indoor surfaces. *Forensic Science International*, 2016, vol. 262. pp. 143-149. doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.02.036
6. Wils E. R. J., Hulst A. G., de Jong A. L. Determination of mustard gas and related vesicants in rubber and paint by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography*, 1992, vol. 625, pp. 382-386. doi.org/10.1016/0021-9673(92)85226-J
7. Brevett C.A.S., Sumpter K. B., Wagner G. W., Rice J. S. Degradation of the blister agent sulfur mustard, bis(2-chloroethyl) sulfide, on concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 140, pp. 353-360. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.067
8. Mizrahi D.M., Goldvaser M., Columbus I. Long-term evaluation of the fate of sulfur mustard on dry and humid soils, asphalt, and concrete. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, vol. 45, pp. 3466–3472. doi.org/10.1021/es200023m