



Всемирная организация
здравоохранения

Европейское региональное бюро

Методы отбора проб и анализа химических загрязнителей воздуха внутри помещений



Публикация, дополняющая
инструмент для скрининговой
оценки рисков для здоровья
комбинированного
воздействия нескольких
химических веществ в воздухе
внутри помещений детских
учреждений



Всемирная организация
здравоохранения

Европейское региональное бюро

Методы отбора проб и анализа химических загрязнителей воздуха внутри помещений

Публикация, дополняющая инструмент для скрининговой оценки рисков для здоровья комбинированного воздействия нескольких химических веществ в воздухе внутри помещений детских учреждений

Резюме

В воздухе внутри помещений содержится множество химических соединений, происходящих как из внешних источников, так и из источников внутри помещений. Европейское региональное бюро ВОЗ подготовило обзор литературы и организовало консультации с экспертами, в результате которых были выявлены наиболее распространенные химические загрязнители воздуха в детских учреждениях (школах, детских садах и центрах дневного ухода), а также разработало инструмент для скрининговой оценки рисков комбинированного воздействия нескольких химических веществ. В настоящей публикации представлена информация о методах отбора проб и анализа 17 химических веществ, включенных в инструмент для скрининговой оценки, а также 40 других вызывающих беспокойство загрязнителей воздуха внутри помещений, которые могут представлять интерес для национальных программ мониторинга качества воздуха внутри помещений. Приоритет отдается методам, описанным Международной организацией по стандартизации и/или Европейским комитетом по стандартизации, и, при отсутствии таковых, методам, опубликованным в рецензируемых научных журналах.

Ключевые слова

AIR POLLUTION, INDOOR – HAZARDOUS SUBSTANCES – ENVIRONMENTAL EXPOSURE

Запросы относительно публикаций Европейского регионального бюро ВОЗ следует направлять по адресу::

Отдел прессы:
Европейское региональное бюро ВОЗ
UN City, Marmorvej 51
DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark

Кроме того, запросы на документацию, информацию по вопросам здравоохранения или разрешение на цитирование или перевод документов ВОЗ можно заполнить в онлайн-режиме на сайте Регионального бюро (<http://www.euro.who.int/pubrequest>).

ISBN 978-92-890-5637-3

© Всемирная организация здравоохранения 2021 г.

Некоторые права защищены. Данная работа распространяется на условиях лицензии Creative Commons «С указанием авторства – На некоммерческих условиях – Распространение на тех же условиях» 3.0 IGO (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo>).

По условиям данной лицензии разрешается копирование, распространение и адаптация работы в некоммерческих целях при условии надлежащего цитирования в указанном ниже порядке. В случае какого-либо использования этой работы не должно подразумеваться, что ВОЗ одобряет какую-либо организацию, товар или услугу. Использование эмблемы ВОЗ не разрешается. Результат адаптации работы должен распространяться на условиях такой же или аналогичной лицензии Creative Commons. Переводы настоящего материала на другие языки должны сопровождаться следующим предупреждением и библиографической ссылкой: «Данный перевод не был выполнен Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ). ВОЗ не несет ответственность за его содержание или точность. Аутентичным и подлинным изданием является оригинальное издание на английском языке: Methods for sampling and analysis of chemical pollutants in indoor air: supplementary publication to the screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2020».

Урегулирование споров, возникающих в связи с лицензией, должно осуществляться в соответствии с правилами по урегулированию споров Всемирной организации интеллектуальной собственности. (<http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules/>).

Образец библиографической ссылки. Методы отбора проб и проведения анализа химических загрязнителей воздуха внутри помещений: публикация, дополняющая инструмент для скрининговой оценки рисков для здоровья комбинированного воздействия нескольких химических веществ в воздухе внутри помещений детских учреждений. Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ; 2021 г. Лицензия: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Данные каталогизации перед публикацией (CIP). Данные CIP доступны по ссылке: <http://apps.who.int/iris>.

Приобретение, вопросы авторских прав и лицензирование. По вопросам приобретения публикаций ВОЗ см. <http://apps.who.int/bookorders>. По вопросам оформления заявок на коммерческое использование и направления запросов, касающихся права пользования и лицензирования, см. <http://www.who.int/about/licensing>.

Материалы третьих сторон. Пользователь, желающий использовать в своих целях содержащиеся в настоящей публикации материалы, принадлежащие третьим сторонам, например таблицы, рисунки или изображения, должен установить, требуется ли для этого разрешение обладателя авторского права, и при необходимости получить такое разрешение. Ответственность за нарушение прав на содержащиеся в публикации материалы третьих сторон несет пользователь.

Оговорки общего характера. Обозначения, используемые в настоящей публикации, и приводимые в ней материалы не отражают какого-либо мнения ВОЗ относительно юридического статуса какой-либо страны, территории, города или района или их органов власти, либо относительно делимитации их границ. Пунктирные линии на географических картах обозначают приблизительные границы, в отношении которых пока еще может быть не достигнуто полное согласие.

Упоминание конкретных компаний или продукции некоторых изготовителей, патентованной или нет, не означает, что ВОЗ поддерживает или рекомендует их, отдавая им предпочтение по сравнению с другими компаниями или продуктами аналогичного характера, не упомянутыми в тексте. За исключением случаев, когда имеют место ошибки и пропуски, названия патентованных продуктов выделяются начальными прописными буквами.

ВОЗ были приняты все разумные меры предосторожности для проверки информации, содержащейся в настоящей публикации. Тем не менее, опубликованные материалы распространяются без какой-либо четко выраженной или подразумеваемой гарантии. Ответственность за интерпретацию и использование материалов ложится на пользователей. ВОЗ ни в коем случае не несет ответственности за ущерб, связанный с использованием этих материалов.

Фотографии на обложке: © ВОЗ/Sergey Volkov; © ВОЗ/Andy Craggs.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ.....	iv
УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	v
1. ВВЕДЕНИЕ	1
2. ВЫБОР МЕТОДОВ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВОЗДУХА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ.....	2
3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИИ ОТБОРА ПРОБ.....	5
4. ПРОЦЕДУРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА	8
4.1 Дублированные и холостые пробы	8
4.2 Стабильность хранения и обращение с пробами	9
4.3 Скорость поглощения.....	9
4.4 Обратная диффузия.....	9
4.5 Идентификация соединений.....	9
4.6 Линейность.....	9
4.7 Прецизионность.....	10
4.8 Точность	10
4.9 ПО и ПКО.....	10
5. МЕТОДЫ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИЗА ПРИОРИТЕТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ВОЗДУХЕ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	12
5.1 Кислородсодержащие ЛОС – альдегиды	12
5.2 ЛОС.....	13
5.3 ПЛОС	15
5.4 Неорганические соединения.....	17
6. МЕТОДЫ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИЗА ДРУГИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВОЗДУХА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ОБЕСПОКОЕННОСТЬ.....	18
6.1 Твердые частицы.....	18
6.2 Неорганические соединения.....	19
6.3 ПЛОС	20
БИБЛИОГРАФИЯ	24
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СПИСОК ПРИОРИТЕТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ, ВКЛЮЧЕННЫХ В ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СКРИНИНГОВОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ ИХ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ДРУГИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ ВОЗДУХА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ОБЕСПОКОЕННОСТЬ	31
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ МЕТОДОВ	33
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. РЕЗЮМЕ МЕТОДОВ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИЗА ХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВОЗДУХА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ	36

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Европейское региональное бюро ВОЗ выражает глубокую благодарность автору, г-же Florentina Villanueva (Институт горения и атмосферного загрязнения, Университет Кастильи-Ла-Манчи, Научно-технологический парк Кастильи-Ла-Манчи, Испания), за подготовку данной публикации под руководством Dorota Jarosinka и Irina Zastenskaya (Европейский центр ВОЗ по окружающей среде и охране здоровья).

Европейское региональное бюро ВОЗ также выражает признательность экспертам, внесшим весомый вклад в обсуждение данной публикации на совещаниях, организованных ВОЗ:

- ◆ Sani Dimitroulopoulou, Служба общественного здравоохранения Англии (Соединенное Королевство);
- ◆ Marta Gabriel, Институт наук и инноваций в области промышленного машиностроения (Португалия);
- ◆ Pawel Rostkowski, Норвежский институт исследования воздуха (Норвегия);
- ◆ Ana Maria Scutaru, Агентство по охране окружающей среды (Германия);
- ◆ Marianne Stranger, Фламандский институт технологических исследований (VITO) (Бельгия).

Настоящая публикация была разработана в рамках проекта разработки инструмента для скрининговой оценки рисков для здоровья комбинированного воздействия нескольких химикатов в воздухе внутри помещений, финансируемого Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы и ядерной безопасности Германии.

УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

БДЭ-28	2,4,4'-трибромдифениловый эфир
БДЭ-47	2,2',4,4'-тетрабромдифениловый эфир
БДЭ-99	2,2',4,4',5-пентабромдифениловый эфир
БДЭ-100	2,2',4,4',6-пентабромдифениловый эфир
БДЭ-153	2,2',4,4',5,5'-гексабромдифениловый эфир
БДЭ-183	2,2',3,4,4',5',6-гептабромдифениловый эфир
БДЭ-209	2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-декабромдифениловый эфир
БОД	бромированные огнестойкие добавки
ВЭЖХ	высокоэффективная жидкостная хроматография
ГХ	газовая хроматография
ГХ-МС	газовая хроматография - масс-спектрометрия
ГХ-МС/МС	газовая хроматография - тандемная масс-спектрометрия
ДБЭ-ДБЦГ	1,2-дибром-4-(1,2-дибромэтил)циклогексан
ДИБФ	диизобутилфталат
ДНБФ	ди-н-бутилфталат
ДНФГ	2,4-динитрофенилгидразин
ДР	десорбция растворителем
ДЦХП	длинноцепные хлорированные парафины
ДЭФ	диэтилфталат
ЖХ	жидкостная хроматография
ИЮПАК	Международный союз теоретической и прикладной химии
КЦХП	короткоцепные хлорированные парафины
ЛОС	летучие органические соединения
МБТГ	3-метил-2-бензотиазолинон гидразон
МПО	малообъемный пробоотборник
МС	масс-спектрометрия
МСВР	масс-спектрометрия высокого разрешения
МСНР	масс-спектрометрия низкого разрешения
ОИЭЗ	отрицательная ионизация электронного захвата
ОК/КК	обеспечение и контроль качества
ПАУ	полициклический ароматический углеводород
ПБДЭ	полибромированный дифенилэфир
ПИД	пламенно-ионизационный детектор
ПКО	предел количественного определения
ПЛЛОС	полулетучие органические соединения
ПО	предел обнаружения
ППО	пассивный пробоотборник

УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ (продолжение)

ППУ	пенополиуретан
ПТФЭ	политетрафторэтилен
ПХБ	полихлорированный бифенил
ПХДД/ПХДФ	полихлорированный дибензодиоксин/дибензофуран
СВФ	стекловолоконный фильтр
СРМ	сертифицированный референтный материал
СЦХП	среднецепные хлорированные парафины
ТБФ	трибутилфосфат
ТБЭФ	трис(2-бутоксиэтил)фосфат
ТД	термическая десорбция
ТХПФ	трис(1-хлорпропан-2-ил)фосфат
ТХЭФ	трис(2-хлорэтил)фосфат
УФ-В	ультрафиолетовая и видимая область спектра
ФКВ	фильтр из кварцевого волокна
ФОСА	фосфорорганические антипирены
ХП	хлорированный парафин
АНТН	тонаlid
СО	оксид углерода
СО ₂	диоксид углерода
EN	европейский стандарт
EPA	Управление по охране окружающей среды США
ННСВ	галаколид
HVAC	система отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха
ISO	Международная организация по стандартизации
LOAEL	наименьшая доза, вызывающая нежелательные эффекты
MRM	мониторинг множественных реакций
NO ₂	диоксид азота
NOAEL	доза, не вызывающая наблюдаемых нежелательных эффектов
O ₃	озон
OSHA	Управление по охране труда и технике безопасности Министерства труда США
PM _{2,5}	твердые частицы с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм
PM ₁₀	твердые частицы с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм
SINPHONIE	Загрязнение воздуха внутри помещений и здоровье: наблюдательная сеть в Европе
SIM	селективный мониторинг ионов

1. ВВЕДЕНИЕ

В воздухе внутри помещений содержится множество химических соединений. Некоторые из этих соединений, включая летучие органические соединения (ЛОС), выделяются в воздух в основном из источников внутри помещений, таких как краска, другие строительные материалы, клей, лаки, потребительские и бытовые товары (1). Другие загрязнители, например, диоксид азота (NO_2) и озон (O_3), являются классическими загрязнителями атмосферного воздуха, проникающими в помещения различными способами и дополняющими вредные вещества, выделяемые из источников внутри помещений (2).

Важность проведения измерений концентрации загрязняющих веществ в воздухе внутри помещений широко обсуждается (3–6). Многие опасные для здоровья химические вещества присутствуют в концентрациях, вызывающих беспокойство (3). Так, важно определять концентрации полувolatile органических соединений (ПЛОС) – одной из групп химических веществ, которые выделяются из строительных материалов и потребительских товаров, – в воздухе школьных помещений (6,7) в связи с их вредным воздействием на здоровье людей (8–10).

Определение концентраций загрязнителей воздуха внутри помещений важно по многим причинам, в том числе для:

- ◆ оценки рисков для здоровья;
- ◆ определения вклада внутренних и внешних источников в суммарные концентрации химических загрязнителей в воздухе внутри помещений (в этом случае также необходимо проводить измерения на открытом воздухе);
- ◆ наблюдения за временными и пространственными тенденциями изменения качества воздуха внутри помещений;
- ◆ оценки соответствия требованиям и стандартам качества воздуха внутри помещений;
- ◆ разработки и обоснования мер по снижению риска.

В рамках проекта по разработке инструмента для скрининговой оценки риска комбинированного воздействия опасных химических веществ, находящихся в воздухе детских учреждений (школ, детских садов и центров дневного ухода), был согласован список из 17 химических веществ для включения в первую версию инструмента (см. приложение 1). При составлении списка учитывались вероятность присутствия химических веществ в воздухе внутри детских учреждений, наличие токсикологической информации о химических веществах и их потенциальный вклад в формирование рисков для здоровья в тех концентрациях, в которых они обычно обнаруживаются в воздухе внутри помещений.

Помимо 17 химических веществ, включенных в данный инструмент, в результате обзора литературы и консультаций с экспертами был выявлен ряд других вызывающих беспокойство загрязнителей воздуха внутри помещений (приложение 2). Информация о методах определения этих химических веществ и твердых частиц, также включена в данную публикацию. Поскольку твердые частицы с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм ($\text{PM}_{2.5}$) и 10 мкм (PM_{10}) не являются химическими веществами, они не могут быть включены в расчет комбинированного воздействия. Однако определение и контроль их концентрации важны, учитывая фактические данные об их воздействии на здоровье людей и их присутствии в воздухе помещений.

2. ВЫБОР МЕТОДОВ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВОЗДУХА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

Для характеристики химического загрязнения воздуха внутри помещений используется ряд методов отбора проб и анализа. В настоящей публикации представлены преимущества и недостатки некоторых методов, которые были выбраны по следующим критериям:

- ◆ наиболее часто используемые для отбора проб и анализа загрязнителей воздуха внутри помещений в детских учреждениях (см. приложение 3);
- ◆ рекомендованные Международной организацией по стандартизации (ISO) (как наиболее предпочтительный вариант);
- ◆ позволяющие проводить количественный анализ концентраций химических веществ и других загрязнителей, часто встречающихся в воздухе детских учреждений;
- ◆ имеющие предел обнаружения (ПО) химических веществ и других загрязнителей ниже пороговой концентрации/дозы, не вызывающей наблюдаемых нежелательных эффектов (NOAEL) или наименьшей концентрации/дозы, при которой наблюдаются нежелательные эффекты (LOAEL).

При выборе также учитывались:

- ◆ возможность рассчитать средние концентрации за период отбора проб;
- ◆ надежность и воспроизводимость результатов;
- ◆ чувствительность к климатическим условиям;
- ◆ сложность процедуры отбора проб и анализа;
- ◆ стоимость;
- ◆ требуемый период отбора проб (не более одного месяца);
- ◆ возможность применения в разных помещениях и условиях;
- ◆ безопасность оборудования и процедуры отбора проб для детей.

Методы отбора проб могут быть пассивными (диффузионными) или активными. Активный отбор проб может быть непрерывным (измерения, проводимые в режиме онлайн, например, при помощи автоматических анализаторов) или периодическим (измерения в режиме офлайн). При периодических отборах проб (как пассивного, так и активного) загрязнители собираются на фильтр или аспирируются в сорбционную трубку для дальнейшего анализа в лаборатории.

Лабораторный анализ обычно состоит из экстракции, очистки (при необходимости) и собственно анализа с использованием аналитического оборудования. Экстракция может проводиться с помощью термодесорбции (ТД) или десорбции растворителем (ДР). Анализ может проводиться с помощью различных аналитических систем в зависимости от анализируемого загрязнителя (например, методом газовой хроматографии (ГХ) и жидкостной хроматографии (ЖХ) с использованием различных детекторов и спектрофотометров ультрафиолетовой и видимой области спектра (УФ-В)).

Пассивный отбор проб является предпочтительным методом для отбора проб загрязнителей воздуха внутри помещений. Для его проведения не требуются насосные системы, источники питания и квалифицированный персонал. К другим преимуществам этого метода относятся низкая стоимость и бесшумная работа. Отбор проб может проводиться в разных местах одновременно и в течение учебной недели (пять дней).

При использовании метода активного отбора проб для измерения уровня формальдегида, концентрации которого в детских учреждениях может быть низкой, может потребоваться большой отрезок времени, что увеличивает стоимость и трудозатраты. Использование пассивных пробоотборников воздуха (ППО) в течение усредненного периода в одну учебную неделю является одним из вариантов для измерения концентраций формальдегида в детских учреждениях, хотя в этом случае сложно оценить соответствие рекомендованному ВОЗ предельному значению формальдегида внутри помещений 100 мкг/м³ при краткосрочном воздействии (30 мин) (3).

ППО подвергаются воздействию в течение определенного периода времени, который составляет от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от целевого загрязнителя. Например, пассивный отбор проб для анализа ПЛОС довольно длительный (3–4 недели).

Под действием градиента концентрации молекулы в газовом состоянии проходят через диффузионную поверхность (воздух) к адсорбирующей поверхности и задерживаются там. Анализ этих молекул позволяет определить средний уровень концентрации загрязнителя за период отбора проб. Для расчета концентрации используется следующая формула.

$$C \text{ (мкг } m^{-3}) = \frac{m \text{ (мкг)}}{Q \text{ (мл мин}^{-1}) \times t \text{ (мин)}} \quad \text{(формула 1)}$$

Где:

- ♦ m – масса загрязнителя;
- ♦ t – время отбора проб;
- ♦ Q – скорость отбора проб (известная как интенсивность диффузионного поглощения), которая зависит от коэффициента диффузии целевого загрязнителя прямо пропорционального площади поперечного сечения отверстия пробоотборника и обратно пропорционального длине диффузионной зоны устройства.

Для каждой модели пробоотборника производитель определяет интенсивность поглощения путем калибровки в стандартной атмосфере. Хотя с помощью одного и того же пробоотборника можно измерять концентрации различных загрязнителей, интенсивность поглощения для каждого из них может быть разной и зависит от температуры воздуха в период отбора проб. Поэтому для расчета концентрации загрязнителя необходимо регистрировать температуру во время отбора проб. Находящиеся в воздухе газы собираются при помощи физического процесса, такого как диффузия через неподвижный слой воздуха или фильтрация через мембрану.

При использовании активных пробоотборников применяется насос для отбора проб, при помощи которого воздух прогоняется через устройство сбора, например, фильтр или сорбционную трубку.

Методы, описанные в данной публикации, были отобраны с учетом рекомендованных методов в серии стандартов ISO 16000. При отсутствии методов ISO в качестве второго и третьего по значимости варианта рассматривались европейские стандарты (EN)

качества атмосферного воздуха и методы, опубликованные в рецензируемых журналах, соответственно.

В публикацию включены следующие стандарты из серии ISO 16000 с конкретными процедурами измерения концентрации разных химических веществ.

- ◆ ISO 16000-1:2004. Воздух внутри помещений – часть 1: общие аспекты методологии отбора проб;
- ◆ ISO 16000-2:2004. Воздух внутри помещений – часть 2: методология отбора проб формальдегида;
- ◆ ISO 16000-4:2011. Воздух внутри помещений – часть 4: определение формальдегида. Метод диффузионного отбора проб;
- ◆ ISO 16000-5:2007. Воздух внутри помещений – часть 5: методология отбора проб летучих органических соединений;
- ◆ ISO 16000-6:2011. Определение летучих органических соединений в воздухе внутри помещений и испытательной камеры путем активного отбора проб на сорбент Tenax TA с последующей термической десорбцией и газохроматографическим анализом с использованием МС или МС/ПИД;
- ◆ ISO 16017-2:2003. Воздух атмосферный, рабочей зоны и замкнутых помещений: отбор проб летучих органических соединений при помощи сорбционной трубки с последующей термодесорбцией и газохроматографическим анализом на капиллярных колонках – часть 2: метод диффузионного отбора проб;
- ◆ ISO 16000-12:2008. Методология отбора проб полихлордифенилов (ПХБ), полихлорированных дибензо-*p*-диоксинов (ПХДД), полихлорированных дибензофуранов (ПХБФ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ);
- ◆ ISO 16000-13:2008. Воздух внутри помещений – часть 13: определение общего содержания полихлорированных диоксиноподобных бифенилов (ПХБ) и полихлорированных дибензо-*para*-диоксинов/дибензофуранов (ПХДД/ПХДФ) (в газообразном состоянии и в виде твердых частиц). Отбор проб на фильтр и сорбент;
- ◆ ISO 16000-15:2008. Воздух внутри помещений: отбор проб для определения содержания диоксида азота (NO₂);
- ◆ ISO 16000-31:2014. Воздух внутри помещений – часть 31: измерение добавок, придающих огнеупорные свойства, и пластификаторов на основе фосфорорганических соединений. Сложные эфиры фосфорной кислоты;
- ◆ ISO 16000-33:2017. Воздух внутри помещений – часть 33: определение содержания фталатов методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии (ГХ/МС);
- ◆ ISO 16000-34:2018. Воздух внутри помещений – часть 34: методология определения содержания твердых частиц;
- ◆ ISO 16000-37:2019. Воздух внутри помещений – часть 37: измерение массовой концентрации PM_{2,5}.

3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИИ ОТБОРА ПРОБ

Что касается методологии проведения мониторинга, в стандарте ISO 16000-1 описываются общие вопросы относительно длительности, времени и места отбора проб загрязнителей воздуха внутри помещений с параллельным измерением концентрации загрязнителей в атмосферном воздухе. Эти вопросы также упоминаются в отчете о совещании Европейского регионального бюро ВОЗ по методам мониторинга качества воздуха в школьных помещениях (11) и в проекте «Загрязнение воздуха внутри помещений и здоровье: наблюдательная сеть в Европе» (SINPHONIE) (12).

Длительность отбора проб: в отношении длительности отбора проб рассматриваются два различных подхода:

1. круглосуточный отбор в течение пяти учебных дней (24 ч/5 дней);
2. отбор в периоды, когда дети находятся в помещении (5-8 часов каждый день учебной недели) (5-8 ч/5 дней).

Первый вариант (беспрерывное измерение в течение пяти дней) может привести к завышенной оценке воздействия некоторых загрязнителей, таких как формальдегид, который может накапливаться в ночное время, когда окна закрыты или механические вентиляционные системы отключены. При этом подходе также можно получить смещенные оценки воздействия NO_2 (направление смещения будет зависеть от вклада внутренних и внешних источников NO_2) (11).

Например, при обследовании школ Парижа (Франция) измерения проводились в разные временные интервалы: восьмичасовые измерения в течение четырех дней (с понедельника по пятницу, кроме среды, когда не было занятий) и круглосуточные измерения в течение пяти дней (с понедельника по пятницу, включая среду). Результаты показали, что при включении периодов, когда помещения пустовали, оценка концентрации формальдегида, ацетальдегида и тетрахлорэтилена была завышена на 14%, 16% и 51% соответственно. Напротив, оценка концентрации толуола, этилбензола, стирола, ксилолов, 1,2,3-триметилбензола и 1,4-дихлорбензола была занижена на 9%, 10%, 8%, 9%, 17% и 15% соответственно (13). Однако в другом обследовании, проведенном в Лионе (Франция), при включении периодов, когда помещения не были заняты, наблюдалась недооценка уровней концентрации формальдегида в школах на 7%, а в детских садах – на 19% (13).

При втором варианте (проведение измерений в периоды, когда дети находятся в помещениях) необходимо закрывать пробоотборники в конце каждого учебного дня и открывать на следующее утро. В этом случае предел обнаружения (ПО) выше, и дополнительные ресурсы могут потребоваться для обеспечения работы пробоотборников, или будет необходимо, чтобы технический персонал ежедневно приходил закрывать и открывать пробоотборники вручную. Поэтому для оценки комбинированного воздействия химических загрязнителей воздуха внутри помещений рекомендуется проводить пассивный отбор проб в течение учебной недели. В рамках проекта SINPHONIE применялась такая стратегия: использовались пассивные пробоотборники (ППО) для отбора химических веществ (формальдегид, бензол, трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, лимонен, α -пинен, NO_2 и O_3) в течение пяти дней с утра понедельника до конца дня пятницы.

В рамках проекта SINPHONIE применялись разные подходы для измерения концентраций разных загрязнителей. Например, пробы $PM_{2.5}$ для анализа гравиметрическим методом собирали в течение восьми часов в день (с 8:00 по 16:00) с учетом связи между $PM_{2.5}$ и плотностью наполнения здания (m^2 на одного ребенка), а также по причинам, связанным с пределом обнаружения. Уровни оксида углерода (CO) измерялись постоянно при помощи прибора, позволяющего оценку краткосрочных воздействий, поскольку именно острое воздействие CO приводит к серьезным последствиям для здоровья. Одновременно с этим измерялись уровни диоксида углерода с целью расчета интенсивности проветривания. Концентрации $PM_{2.5}$ и PM_{10} также постоянно измерялись методом оптического рассеяния света (12).

Время отбора проб: концентрации некоторых загрязнителей могут варьироваться в зависимости от времени года, когда проводится отбор проб. Выбросы формальдегида из материалов и изделий зависят от нескольких факторов, таких как температура и относительная влажность (ISO 16000-1:2004), а также интенсивность вентиляции. Таким образом, анализ загрязнения воздуха внутри помещений в холодный (отопительный) сезон (с ноября по март в северном полушарии) будет характеризовать пиковые уровни воздействия определенных соединений.

В отчете о совещании Европейского регионального бюро ВОЗ по методам мониторинга качества воздуха в школьных помещениях отбор проб рекомендовано проводить в отопительный сезон для выявления более высоких уровней экспозиции к формальдегиду, бензолу и NO_2 (11). Для оценки сезонных колебаний концентраций загрязнителей в воздухе внутри помещений следует также проводить измерения в теплый сезон (когда не работают системы отопления), особенно в жарких странах. Отбор проб в сезон, когда отключено отопление, зависит от географического положения страны. В рамках проекта SINPHONIE, например, измерения во время неотопительного сезона проводились с августа по сентябрь (в зависимости от начала нового учебного года и климатических условий) и с мая по июнь.

Эти измерения должны проводиться в одной и той же школе как минимум за два месяца до и после измерений, проводимых в отопительный сезон. Пробоотборники должны быть расположены в одних и тех же местах в помещении и на улице во время обеих кампаний для достижения максимальной сопоставимости результатов (12).

Критерии выбора классных комнат: в каждой школе следует выбрать не менее трех классных комнат (по одному пробоотборнику на классную комнату) по следующим критериям:

- ◆ насколько они репрезентативны для здания школы;
- ◆ насколько регулярно и постоянно они используются в учебное время;
- ◆ их расположение на разных этажах (11).

Можно рассмотреть дополнительные критерии, такие как ориентация классных комнат (окна выходят на улицу или во двор) и время их использования (например, можно выбрать классные комнаты, которые использовались не менее шести месяцев, чтобы исключить влияние эмиссий из новых строительных материалов) (12). В случае, если классные комнаты характеризуются одинаковыми условиями, следует выбирать те, в которых учится больше учеников (12).

Месторасположение пробоотборников: важным фактором в отборе проб является влияние скорости потока воздуха на результаты анализа. Для диффузионных пробоотборников предпочтителен минимальный поток воздуха (11). В стандарте

ISO 16000-1 рекомендуется размещать пробоотборники в центре комнаты. Если это невозможно, пробоотборник следует размещать на расстоянии 1–2 м от стены и 1–1,5 м от пола на уровне дыхания учащихся (12). Пробоотборники необходимо разместить так, чтобы предотвратить контакт с людьми, например, на более высоком месте и/или ближе к стене. В проекте SINPHONIE точки отбора проб были на уровне дыхания сидящих учеников (12). (См. также рекомендации по конкретным загрязнителям в разделах 5 и 6).

Отбор проб атмосферного воздуха (по возможности): измерение концентрации атмосферных загрязнителей может помочь определить вклад внешних источников в загрязнение воздуха внутри помещений. Измерение уровней некоторых загрязнителей в атмосферном воздухе, таких как формальдегид и ПЛОС (кроме ПАУ) менее важно, т.к. основные источники этих химических веществ обычно находятся внутри помещений (11,14–17). Для каждой точки отбора проб вне помещений необходимо зарегистрировать расстояние до автодороги (и тип дороги) и/или промышленных источников эмиссии. Пробоотборники должны размещаться вблизи здания школы, но не ближе, чем 1 м (ISO 16000-1:2004). Если в здании имеется система отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC), отбор проб атмосферного воздуха следует проводить около воздухозаборника (12). Пробоотборники должны быть защищены от попадания прямых солнечных лучей и осадков, а также по мере возможности от людей.

Информация о деятельности человека и потенциальных источниках эмиссии: все факторы, влияющие на качество воздуха внутри помещений, следует анализировать и регистрировать, включая виды деятельности в классных комнатах, режим уборки и используемые чистящие и моющие средства, HVAC, мебель и оборудование, потенциальные внешние источники загрязнителей (11,12). Рекомендации о том, какую информацию следует собирать во время отбора проб воздуха внутри помещений, можно найти в стандарте ISO 16000-1.

4. ПРОЦЕДУРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

Процедуры обеспечения и контроля качества (ОК/КК) относятся к деятельности, осуществляемой лабораторией для обеспечения точности (насколько близки к реальным концентрациям результаты, сообщаемые лабораторией) и прецизионности данных (насколько воспроизводимы результаты). Обычно оценивают несколько аналитических параметров – линейность, прецизионность, точность (или восстановление), ПО и предел количественного определения (ПКО) – для обеспечения применения выбранного метода при анализе образцов. В стандартах ISO описываются подробные протоколы ОК/КК для конкретных соединений. В данной главе описаны общие процедуры, выполняемые в рамках программы ОК/КК.

Для обеспечения последовательности рекомендуется проводить анализ всех образцов в одной и той же лаборатории. Однако это может быть невозможно ввиду различных причин (11). Минимальные требования к программе ОК/КК состоят в первоначальной демонстрации возможностей лаборатории и периодическом анализе холостых проб, проб, в которые добавлены известные количества химического вещества, и сертифицированных референтных материалов (СРМ), как объясняется ниже, а также в постоянном наблюдении за результатами работы.

Обычно в каждой стране назначается референтная лаборатория. Если для анализа образцов выбраны разные лаборатории, то до начала обследования они должны подтвердить свою компетентность в ходе сравнительных анализов образцов с известной концентрацией химикатов. Контрольные образцы должны быть подготовлены референтными лабораториями (11). Статистический анализ результатов может быть проведен в соответствии со стандартом ISO 5725. Те лаборатории, которые не соответствуют установленным требованиям, должны определить источники ошибок и принять меры для их устранения.

Описанные ниже процедуры ОК/КК предназначены для получения аналитических результатов, отличающихся высоким качеством, надежностью и последовательностью, а также для минимизации ошибок при отборе проб и их анализе с целью избежать ненужного повторения этих процедур. Результаты проверки качества данных следует сравнивать с требованиями по обеспечению эффективности методов.

4.1 Дублированные и холостые пробы

В каждую партию проб должны включаться дублированные и холостые пробы. Нужно отобрать, как минимум, 10% дублированных проб. Смещение результатов при анализе дублированных проб ниже или равное 30% является приемлемым (12). Также необходимо отобрать, как минимум, одну холостую пробу (пробоотборник устанавливается в классе, но не открывается) в каждом здании. В дополнение, хотя бы одна лабораторная холостая проба (пробоотборник, который не размещался в школе, а хранился в лаборатории) должна анализироваться с каждой партией проб.

Холостые пробы анализируются аналогичным образом, что и обычные пробы воздуха внутри помещений. Холостые пробы должны быть подготовлены в соответствии с процедурами, установленными лабораторией, и в соответствии со стандартами ISO для анализируемых соединений. Стандарты ISO также могут предоставить конкретные инструкции относительно уровня содержания аналитов в пробах.

4.2 Стабильность хранения и обращение с пробами

После отбора пробы должны быть отправлены в лабораторию как можно быстрее и помещены на хранение в соответствии с аналитическими процедурами, установленными для каждого типа пробоотборника. Образцы стабильны определенный период времени, и должны быть проанализированы в течение этого времени. В разделах 5 и 6 описаны требования к хранению проб по каждой группе химических веществ.

4.3 Скорость поглощения

Для ППО скорость поглощения для каждого соединения описывается в стандартах ISO с учетом конкретных размеров пробоотборника. Для других спецификаций, возможно, потребуется руководствоваться стандартами EN 838 или EN 13528-2 для расчета скорости поглощения. Производитель каждого коммерческого ППО предоставляет данные о скорости поглощения для каждого загрязнителя.

Поскольку скорость поглощения может зависеть от температуры воздуха, ее измерение в период отбора проб является обязательным. Формулу для расчета концентрации загрязнителей с учетом коррекции скорости поглощения в зависимости от температуры предоставляют производители.

4.4 Обратная диффузия

Обратная диффузия происходит в том случае, когда адсорбированная масса анализируемого химиката далека от максимальной концентрации, допустимой адсорбирующей емкостью. Степень обратной диффузии зависит от концентрации и времени экспозиции. Чтобы ее избежать, производители ППО дают инструкции относительно времени отбора проб и концентрации загрязнителей.

4.5 Идентификация соединений

Для идентификации соединений рекомендуется использовать следующие два правила.

1. Соотношение хроматографического времени удержания соединения ко времени удержания, обозначенного во внутреннем стандарте (относительное время удержания соединения), должно соответствовать времени удержания калибровочного раствора с допуском $\pm 0,5\%$ для ГХ и $2,5\%$ для ЖХ. Если внутренний стандарт не используется, время удержания должно быть таким же с допуском 5% (18).
2. В ГХ-МС идентичность пика должна быть подтверждена соотношением интенсивности целевого иона или перехода количественного определения (Q) к иону-определителю или переходу подтверждения (q) (Q/q). Для этого соотношение Q/q образца нужно сравнить с соотношением Q/q калибровочного стандарта с учетом допусков, разрешенных, например, решением Европейской комиссии 2002/657/EC (18).

4.6 Линейность

Аналитические системы должны быть первоначально откалиброваны с использованием минимум пяти концентраций в диапазоне ожидаемых концентраций в пробах для определения линейной реакции целевых аналитов. Калибровочная кривая должна проверяться как минимум раз в день или в соответствии с инструкциями аналитической процедуры.

4.7 Прецизионность

Прецизионность описывается как степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных установленных условиях (ISO 5725-3:1994). Аналитическая прецизионность измеряет изменчивость результатов повторных анализов одной и той же пробы. Для оценки прецизионности используются лабораторные контрольные образцы. Данные прецизионности для аналитов можно получить, используя СРМ и/или лабораторные холостые пробы с аналитами в известной концентрации (если СРМ нет в продаже).

Аналиты могут быть добавлены в пять холостых проб, которые используются для проверки прецизионности прибора. Затем пробы могут быть извлечены и проанализированы в соответствии с той же процедурой. Прецизионность рассчитывается как коэффициент отклонения. Если критерии приемки удовлетворены для всех целевых загрязнителей, лаборатория может начать анализ холостых проб и отобранных проб. Необходимо проводить текущий анализ контрольных лабораторных проб. Периодичность должна быть установлена заранее. Более подробную информацию об измерениях прецизионности можно найти в серии стандартов ISO 5725.

4.8 Точность

Точность описывается как степень близости результата измерений к истинному значению (ISO 5725-1). Ее можно определить при помощи расчета эффективности извлечения или десорбции. Для определения точности используются аналогичные методы, что и для определения прецизионности: при помощи СРМ и/или лабораторных холостых проб. Измерение можно считать точным, если измеренная в ходе анализа концентрация имеет значение или представляет коэффициент извлечения в допустимых лабораторией пределах. Обычно требования к точности устанавливаются для каждого аналитического метода (см. стандарты ISO).

Чтобы продолжить наблюдение за эффективностью работы, рекомендуется подготовить таблицу коэффициентов извлечения и относительного процентного изменения для каждого осуществляемого анализа лабораторных контрольных образцов, а также сделать графическое представление каждого загрязнителя. Более подробную информацию об измерениях точности можно найти в серии стандартов ISO 5725.

4.9 ПО и ПКО

ПО – это единственный параметр, для которого существуют различные определения и многочисленные методы оценки (19). Согласно Международному союзу теоретической и прикладной химии (ИЮПАК), общепринятое определение гласит, что ПО может быть выведен из наименьшей меры, которая может быть установлена с разумной степенью достоверности для данной аналитической процедуры (20). Значение x_L рассчитывается при помощи следующей формулы.

$$x_L = \bar{x}_{Bl} + k s_{Bl} \quad (\text{формула 2})$$

Где:

- ♦ x_{Bl} – среднее значение результатов холостых измерений;
- ♦ s_{Bl} – стандартное отклонение результатов холостых измерений;
- ♦ k – числовой коэффициент, выбираемый в зависимости от желаемого уровня доверия (рекомендуется значение 3).

3. Преобразование сигнала ПО в соответствующую концентрацию или количество осуществляется с помощью калибровочной кривой. Для воздуха внутри помещений и атмосферного воздуха ПО обычно выражается в единицах массы в объеме (мкг/м³).

ПКО может рассматриваться как нижний предел точных количественных измерений. К другим часто используемым методам оценки ПО и ПКО относятся:

- ◆ расчет по соотношению сигнал/шум (ПО и ПКО соответствуют 3- и 10-кратному уровню шума, соответственно); или
- ◆ расчет по калибровочному графику при низких концентрациях (21).

Для расчета ПО и ПКО также часто используется следующая формула.

$$\text{ПО или ПКО} = \frac{k \times S}{b} \quad (\text{формула 3})$$

Где:

- ◆ k – множители 3 и 10 для ПО и ПКО соответственно;
- ◆ S – стандартное отклонение холостого образца, стандартное отклонение точки пересечения оси ординат или остаточное стандартное отклонение линейной регрессии;
- ◆ b – наклон линии регрессии (в случае, если S является безразмерным аналитическим сигналом).

В этом случае уровень холостого образца не включается.

Лаборатории должны предоставить информацию о методе, использованном для оценки ПО и ПКО. Другие распространенные методы описаны Международным советом по гармонизации технических требований к регистрации лекарственных препаратов для медицинского применения (ICH) (21).

5. МЕТОДЫ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИЗА ПРИОРИТЕТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ВОЗДУХЕ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В данной публикации приоритет отдается методам, рекомендованным в стандартах ISO для измерения концентраций химических соединений в воздухе внутри помещений. Однако методы, аккредитованные на национальном уровне и/или опубликованные в рецензируемых журналах, также могут использоваться.

Методы отбора проб, используемые для измерения концентраций загрязнителей атмосферного воздуха, также могут быть использованы для измерения загрязнителей воздуха внутри помещений, но при этом следует учитывать некоторые ограничения, связанные с шумом, размером или скоростью отбора проб. В данной главе описаны конкретные протоколы для отбора проб и анализа 17 загрязнителей, включенных в инструмент для оценки риска комбинированного воздействия опасных химических веществ в воздухе внутри помещений (см. приложения 1 и 4).

5.1 Кислородсодержащие ЛОС – альдегиды

Альдегиды, включенные в список приоритетных химических веществ, – это формальдегид и ацетальдегид. Подробный протокол отбора проб формальдегида приводится в стандарте ISO 16000-2, а аналитическая процедура – в стандарте ISO 16000-4. Тот же протокол отбора проб применим к ацетальдегиду и другим альдегидам.

Месторасположение пробоотборников: расположение пробоотборников в помещении может существенно влиять на результаты измерений. Отбор проб вблизи предполагаемого источника выбросов, например, мебели из древесно-стружечной плиты, часто приводит к определению более высоких концентраций, чем в других местах того же помещения. Это может быть причиной завышенной оценки воздействия формальдегида на детей, находящихся в классе. Пробоотборники следует размещать в центре классной комнаты (или на расстоянии 1–2 м от стены) и на высоте 1–1,2 м, что является средней зоной дыхания (ISO 16000-1:2004). Следует избегать расположения пробоотборников на солнце или вблизи воздуховодов систем HVAC, где поток воздуха может повлиять на результаты.

Диффузионные пробоотборники: пары альдегида мигрируют в ППО путем диффузии и сорбируются на полоске целлюлозной бумаги, покрытой 2,4-динитрофенилгидразином (ДНФГ) и фосфорной кислотой (ISO 16000-4:2011). Альдегиды реагируют с ДНФГ с образованием устойчивых 2,4-динитрофенилгидразонов. Можно использовать коммерческие ППО или изготовленные в лаборатории, если их рабочие характеристики отвечают соответствующим требованиям. Скорость отбора проб должна быть неизменной при относительной влажности до 80% и скорости ветра до 0,02 м/с.

Информация о деятельности человека и потенциальных источниках эмиссии: в дополнение к информации о том, насколько занята классная комната и какие виды деятельности в ней осуществляются, необходимо регистрировать данные о потенциальных источниках эмиссии, таких как новая мебель, недавно проведенный ремонт или использование химических веществ.

Хранение и обработка проб: после завершения отбора проб пробоотборники необходимо поместить в запечатанный защитный контейнер и хранить в морозителе до анализа. Анализ в идеале должен производиться в течение двух недель с момента отбора проб или трех дней, если уже была проведена экстракция раствора ДНФГ-формальдегида.

Лабораторный анализ: гидразон десорбируется из пробоотборника ацетонитрилом и этот раствор фильтруется и анализируется с использованием высокоэффективного жидкостного хроматографа (ВЭЖХ), оборудованного ультрафиолетовым детектором (УФ), который работает при длине волны 360 нм. Соответствующие рекомендации по безопасности работы в лаборатории должны быть включены в протокол анализа. Аналитическая процедура и условия работы ВЭЖХ, описанные в стандартах ISO 16000-4 и 16000-3, применимы для определения ацетальдегида (22). Данный метод подходит для определения этих соединений в диапазоне концентраций от 1 мкг/м³ до 1 мг/м³.

Помехи в данном методе могут быть вызваны высокими концентрациями NO₂, которые могут негативно повлиять на отбор проб и измерение содержания формальдегида из-за реакции между NO₂ и ДНФГ. Время удержания производного реакции NO₂ и ДНФГ может быть аналогичным тому, которое наблюдается для производного реакции формальдегида и ДНФГ, в зависимости от выбранных параметров и колонки.

Формальдегид и ацетальдегид обычно собирают одновременно с помощью ППО и анализируются с помощью ВЭЖХ с УФ-детектором (22-25).

5.2 ЛОС

ЛОС, включенные в список приоритетных химических веществ (см. приложение 1 и таблицу 4), – это ароматические углеводороды (бензол, этилбензол, о-, м-, п-ксилол, стирол, толуол, 1,2,3-триметилбензол и 1,4-дихлорбензол), сложные эфиры (бутилацетат), терпены (лимонен и α-пинен) и хлорированные углеводороды (тетрахлорэтилен и трихлорэтилен). Нафталин также присутствует в воздухе в газообразном состоянии и может быть собран и проанализирован вместе с упомянутыми выше ЛОС (ISO 16000-5:2007).

Подробный протокол отбора проб ЛОС приведен в стандарте ISO 16000-5, а аналитическая процедура с использованием ТД и ГХ на капиллярных колонках (метод 1) изложена в стандарте ISO 16017-2. Преимуществом метода 1 является то, что он не требует манипуляций с сорбционными трубками или использования опасных растворителей во время анализа, особенно во время химической экстракции. Можно также использовать другую аналитическую процедуру с использованием ДР и ГХ на капиллярных колонках (метод 2); этот метод описан в стандарте EN 14662-5.

Месторасположение пробоотборников: поскольку большинство ЛОС выбрасывается из точечных источников, наличие источника эмиссий может привести к образованию градиента концентрации из-за недостаточного перемешивания воздуха. Поэтому месторасположение пробоотборника может повлиять на результат измерения. Цель заключается в том, чтобы определить уровни концентрации ЛОС там, где воздух обычно вдыхают дети. Пробоотборники следует размещать на расстоянии 1–2 м от стены и на высоте 1–1,2 м от пола.

Протокол записи информации об осуществляемой деятельности в помещении и условиях во время отбора проб: временная эмиссия может произойти в классных комнатах ввиду разных видов деятельности или поведения находящихся в них людей, отклонения от нормальной работы систем HVAC и/или изменения микроклиматических условий. Все это следует регистрировать для правильной оценки аналитических

результатов. В приложении D к стандарту ISO 16000-1 представлены общие рекомендации относительно информации, подлежащей регистрации.

5.2.1 Метод 1: отбор проб и анализ ЛОС при помощи сорбционной трубки/ГХ на капиллярных колонках (ISO 16017-2)

Диффузионные пробоотборники: пары органических соединений мигрирует в ППО в результате диффузии и собираются на адсорбенте (например, Carborack™ В/С, Carborack™ В/С, Carbograph™ TD-1 или Tenax® TA/TG, предпочтительно с размером сетки 60–80). ППО можно купить или изготовить в лаборатории в соответствии с рекомендациями стандарта ISO 16017-2. Трубки должны быть откалиброваны до начала отбора проб. В стандарте ISO 16017-2 приводится скорость отбора проб загрязнителей с использованием трубки с внешним и внутренним диаметрами 6,3 мм и 5 мм, соответственно, 90 мм в длину, содержащих конкретный вид адсорбента. Трубки должны быть совместимы с используемым устройством для ТД.

Поли(2,6-дифенил-п-фениленоксид) (Tenax® TA) можно использовать в качестве адсорбента, но требования к отбору проб 1,4-дихлорбензола, лимонена, α-пинена и трихлорэтилена не включены в стандарт ISO 16017-2. Скорость отбора проб можно рассчитать при помощи стандартов EN 838 или ISO 13528-2. Имеющиеся в продаже сорбционные трубки протестированы для измерения представляющих интерес ЛОС (за исключением нафталина для некоторых коммерческих марок) с использованием графитированного угля. Tenax® также можно использовать в качестве адсорбента при условии обеспечения подходящей скорости отбора проб для всех представляющих интерес соединений.

Хранение и обработка проб: после отбора проб диффузионную крышку заменяют на крышку, используемую для хранения. При маркировке трубок не используют краски и маркеры, содержащие растворители, а также приклеивающиеся этикетки. Если анализ проб не будет проведен в течение ближайших 8 часов, то их помещают в герметичный контейнер из стекла или металла без покрытия.

Лабораторный анализ: десорбционные трубки помещаются в совместимые с ними устройства ТД. При использовании этого метода ЛОС концентрируются в холодной ловушке перед введением в газовый хроматограф. Десорбированные соединения анализируются с помощью газового хроматографа, соединенного с масс-спектрометром, пламенно-ионизационным детектором (ПИД) или фотоионизационным детектором (ФИД).

5.2.2 Метод 2: отбор проб и проведение анализа ЛОС при помощи сорбционной трубки/ДР/ГХ на капиллярных колонках (EN 14662-5)

Если анализ ЛОС нельзя провести при помощи ТД, то самой оптимальной по цене альтернативой является ДР. Стандарт EN 14662-5 касается бензола, но описанная в нем методология ДР также применима к остальным ЛОС, представляющим интерес (25).

Диффузионные пробоотборники: органические пары мигрируют в ППО в результате диффузии и задерживаются на адсорбенте (обычно активированный уголь с размером частиц 0,35-0,85 мм). Имеющиеся в продаже ППО заполняются активированным углем, предварительно подготовленным производителем. Поставщики ППО, используемых для сбора ЛОС, перечислены в приложении А к стандарту EN 14662-5:2005. Производитель определяет предварительную скорость отбора проб.

Лабораторный анализ: ЛОС экстрагируются растворителем, обычно дисульфидом углерода (CS₂). Раствор перемешивают в течение 30 минут и анализируют методом ГХ с

использованием детектора ПИД или ФИД. Для количественного определения используется внутренний стандарт, который может быть добавлен к образцу после экстракции CS₂. Внутренний стандарт добавляют для коррекции небольших изменений в объеме вводимого CS₂ и включают 2-фтортолуол (при использовании ПИД), а также бензол-d6 и толуол-d8 (при использовании МС). Для разделения ЛОС в газовом хроматографе рекомендуется та же программа температуры, которая описана в стандарте ISO 16017-2.

5.3 ПЛОС

Согласно ВОЗ, ПЛОС — это органические загрязнители воздуха внутри помещений с температурой кипения от 240–260 °С до 380–400 °С (26). Когда ПЛОС выделяются в воздух помещений, они, ввиду своих физических и химических свойств, частично остаются в воздухе (газообразное состояние и состояние твердых частиц), частично оседают на поверхности (осевшая пыль) (27). Два ПАУ (нафталин и бензо(а)пирен) были включены в список приоритетных химических веществ (см. приложение 1 и таблицу 4). Давление паров нафталина составляет $1,1 \times 10^{-2}$ кПа, он находится в основном в газообразном состоянии; его пробы можно собирать вместе с пробами ЛОС в соответствии со стандартами ISO 16017-2 или EN 146625. Давление паров бензо(а)пирена составляет $7,3 \times 10^{-10}$ кПа, он может находиться в состоянии твердых частиц (ISO 12884).

К недостаткам пассивного отбора проб на ПЛОС относятся необходимость калибровки с использованием референтного метода, изменчивость скорости поглощения и сложность сбора химических веществ, находящихся в состоянии твердых частиц (28). В настоящее время наиболее широко используемым типом ППО для ПЛОС является диск из пенополиуретана (ППУ) благодаря его высокой удерживающей способности (29,30). Хотя ППО первоначально были разработаны для сбора ПЛОС в газообразном состоянии, они широко используются для получения данных о концентрации ПЛОС в состоянии твердых частиц (31). (Обратите внимание, что для аналитического обнаружения требуется более длительное время развертывания).

ППУ-ППО широко используются для отбора проб атмосферного воздуха. Например, ППУ-ППО использовались в помещениях после калибровки для выявления ПХБ, бромированных огнестойких добавок (БОД), полибромированных дифениловых эфиров (ПБДЭ), фосфорорганических соединений (ФОС) и ПАУ (16,31-35). В этих исследованиях была предусмотрена различная скорость отбора проб для представляющих интерес ПЛОС в зависимости от конфигурации используемого ППО: ППУ-диск внутри двух куполов из нержавеющей стали (полностью защищенный) или ППУ-диск внутри одного купола из нержавеющей стали (частично защищенный). Исследования на предмет выявления мускусов в воздухе внутри помещений с использованием ППУ-ППО не проводились (см. таблицу 4), также мало исследований было проведено на предмет содержания фталатов (15,35).

Применение ППУ-ППО для выявления в воздухе помещений всех ПЛОС, перечисленных в таблице 4, особенно ПАУ, фталатов и полициклических мускусов, ограничено, и необходимо проводить калибровку на основе надежных результатов активного отбора проб воздуха. В связи с ограничениями, связанными с использованием ППУ-ППО, а также поскольку существует специальный стандарт ISO, разработанный для обеспечения качества воздуха внутри помещений (16000-12: 2008), для измерения уровня ПЛОС (особенно бензо(а)пирена) (см. приложение 1), а также других ПАУ (см. приложение 2) предпочтительнее использовать активные пробоотборники.

Месторасположение пробоотборников: общие правила отбора проб описаны в стандарте ISO 16000-1. Пробоотборники следует размещать на расстоянии 1–2 м от стены и на высоте 1–1,2 м от пола.

5.3.1 ПАУ

Метод, описанный в данном разделе, можно применять для измерения концентраций нафталина, бензо(а)пирена (см. приложение 1) и ПАУ, перечисленных в приложении 2. Методология отбора проб для ПАУ представлена в стандарте ISO 16000-12 с использованием малообъемного пробоотборника (МПО). Протокол анализа приводится в стандартах ISO 12884 для ПАУ в газообразном состоянии и состоянии твердых частиц и ISO 16362 для ПАУ в виде твердых частиц. Согласно ISO 16000-12, для определения концентрации ПАУ должен использоваться тот же протокол, что и для измерения общего уровня ПХБ и ПХДД/ПХДФ, описанный в стандарте ISO 16000-13. Аналогичным образом, этот протокол измерения может быть применим к большинству ПЛОС, включенных в приложение 2.

Активные пробоотборники: из-за шума следует использовать только МПО (с диапазоном расхода 1,2-2,8 м³/ч). Если одновременно будут измеряться РМ₁₀ и РМ_{2,5} (устройством с соответствующим размером входного отверстия), то фильтр, используемый для сбора этих частиц, можно также использовать для анализа ПАУ. Метод, описанный в стандарте ISO 16000-13, включает процедуру отбора проб, при которой загрязнители собирают на фильтр для мелкодисперсных частиц (твердых частиц) и сорбционную ловушку, состоящую из ППУ-диска (для парофазной фракции). Подробную информацию об отборе проб можно найти в стандарте ISO 16000-12.

Хранение и обработка проб: фильтр и сорбционная ловушка (ППУ-диск) обычно калибруются перед использованием. Фильтры предварительно подвергаются термической обработке при высоких температурах в течение нескольких часов, а ППУ-диски очищаются растворителем (например, дихлорметаном или толуолом) для удаления органических соединений. После отбора проб фильтры и сорбционные ловушки заворачивают в алюминиевую фольгу (предварительно промытую растворителями), запечатывают в чистый и герметично закрывающийся контейнер и доставляют в лабораторию в охлажденном виде. Образец стабилен в течение одного месяца.

Лабораторный анализ: подробное описание аналитической процедуры с использованием ГХ-МС приводится в стандарте ISO 12884. Химические вещества с фильтра и ППУ-диска могут экстрагироваться при помощи аппарата Сокслета, ускоренного экстрактора растворителем или с применением другого проверенного метода экстракции. В качестве растворителя для экстракции используют дихлорметан. Перед экстракцией в образец необходимо добавить стандарты для проверки эффективности извлечения. Экстракт концентрируют, добавляют в него внутренние стандарты и хранят при температуре -18 °С до анализа. Информация об эффективности извлечения и внутренних стандартах, которые могут быть использованы для количественного определения ПАУ, приведена в стандарте ISO 12884.

Очистку можно проводить методом колоночной хроматографии на силикагеле. ПАУ анализируют с помощью ГХ-МС в режиме селективного мониторинга ионов (SIM) или, при наличии тройного квадрупольного, в режиме мониторинга множественных реакций (MRM). Характерные ионы для обнаружения избранных ПАУ методом МС, а также внутренние стандарты и стандарты для проверки эффективности извлечения приводятся в ISO 12884, а переходы, контролируемые в режиме МРМ для каждого соединения, были описаны ранее (36,37). Рекомендуется использовать капиллярные колонки длиной от 30 до 50 м с внутренним диаметром 0,25 мм, с 5%-ным фенилметилсиликоном (с толщиной пленки 25 мкм).

Эффективность отбора проб или динамическая эффективность удержания: эффективность отбора проб определяется для того, чтобы оценить способность пенополиуретана удерживать аналиты. Для этого раствор представляющих интерес

ПЛОС наносится на чистый фильтр и сорбционный картридж. Через устройство пропускают воздух при том же потоке и в течение того же периода времени, которые требуются для отбора проб.

Динамическая эффективность удержания определяется путем нанесения сорбента непосредственно на чистый фильтр, помещенный перед ППУ-диском, и следуя той же процедуре. Подробное описание процедуры приводится в стандарте ISO 16000-13 и работе Raffy et al. (7).

5.4 Неорганические соединения

К неорганическим соединениям, обычно встречающимся в воздухе внутри помещений, относятся NO_2 , CO и O_3 . Основные источники этих загрязнителей находятся вне помещений. NO_2 , который можно собрать с помощью ППО, является единственным неорганическим соединением, которое было включено в инструмент для оценки риска комбинированного воздействия опасных химических веществ в воздухе внутри помещений.

5.4.1 NO_2

Подробный протокол отбора проб NO_2 приводится в стандарте ISO 16000-15.

Месторасположение пробоотборников: обычно достаточно одной точки отбора проб в помещении. Пробоотборник следует располагать на высоте 1,5 м от пола и на расстоянии 1–1,5 м (максимум 2 м) от стен. Их не следует размещать возле воздуховодов систем HVAC. Концентрация NO_2 внутри помещений зависит от концентрации NO_2 в атмосферном воздухе, особенно если здание расположено возле автомагистралей с интенсивным движением. Если одновременно будут измеряться концентрации в атмосферном воздухе, пробоотборники на открытом воздухе лучше поместить в защитное укрытие, чтобы избежать попадания прямых солнечных лучей или осадков.

Диффузионные пробоотборники: в продаже имеется несколько моделей ППО для измерения концентрации NO_2 . В стандарте EN 13528-3 приводится руководство по выбору, использованию и техническому обслуживанию ППО. Часто используются ППО на основе триэтаноламинового адсорбента. При высокой относительной влажности следует соблюдать особую осторожность, так как триэтанолламин очень гигроскопичен. Дополнительную информацию можно найти в работе Hafkenschied et al. (38).

Хранение и обработка проб: после завершения отбора проб пробоотборники необходимо поместить в запечатанный защитный контейнер и хранить в темном месте при температуре 4 °C до анализа. Хотя некоторые виды ППО стабильны вплоть до четырех месяцев после отбора проб, в идеале анализ рекомендуется проводиться в течение двух недель после отбора проб.

Лабораторный анализ: NO_2 в воздухе улавливается и хемосорбируется на триэтаноламине в виде нитрит-иона. Нитрит определяется количественно с помощью УФ-В спектрофотометра при длине волны 540 нм. Аналитическая процедура, основанная на модифицированном методе Грисса-Зальцмана, описана в стандартах ISO 6768 и EN 16339. Более подробную информацию можно найти в стандарте ISO 16000-15.

ППО с триэтаноламином и анализ методом УФ-В спектрофотометрии широко используются (25,39–42). Ozden & Dogeroglu (43) подготовили обзор различных методов отбора проб и анализа NO_2 , также имеется пример проведения аналитической процедуры с использованием пробоотборника Radiello® (44). В продаже имеются и другие типы ППО (Ogawa, SKC и т.д.).

6. МЕТОДЫ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИЗА ДРУГИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВОЗДУХА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ОБЕСПОКОЕННОСТЬ

В данном разделе описаны методы отбора проб и анализа загрязнителей, включенных в приложение 2: твердые частицы, O_3 , CO, фталаты, мускусы, БОД, фосфорорганические антипирены (ФОСА) и хлорированные парафины (ХП). Эти соединения являются распространенными загрязнителями воздуха внутри помещений в детских учреждениях и могут измеряться для обеспечения надлежащего качества воздуха в помещениях. На данном этапе они не включены в инструмент для оценки риска комбинированного воздействия опасных химических веществ, в основном из-за отсутствия токсикологической информации, необходимой для проведения такой оценки.

6.1 Твердые частицы

Подробное описание методологии измерения твердых частиц в воздухе приводится в стандарте ISO 16000, часть 34. В стандарте ISO 16000, часть 37, описаны методологии измерения массовой концентрации $PM_{2,5}$ внутри помещений. Методы и стратегии измерения, описанные в ISO 16000-37, также могут быть использованы и для определения концентрации PM_{10} .

Существует два вида приборов для измерения концентрации твердых частиц: одни позволяют измерить средние концентрации за период отбора проб, другие позволяют наблюдать за уровнями концентрации в режиме реального времени. Приборы для измерения концентрации в пробах воздуха обычно основаны на гравиметрическом методе и считаются наиболее точными. Оптические приборы, в которых измерение проводится по рассеянию, поглощению или затуханию света, вызванного твердыми частицами, позволяют проводить измерения в режиме реального времени. Микровесовые методы (например, с применением сенсора TEOMTM) также дают результаты измерения, которые можно регистрировать практически в режиме реального времени (45).

В стандарте ISO 16000-37 рекомендуется использовать гравиметрический метод для измерения концентрации $PM_{2,5}$. Дополнительными вариантами являются методы с высоким временным разрешением. В рамках проекта SINPHONIE применялась следующая методология: концентрации PM_{10} и $PM_{2,5}$ постоянно измерялись методом оптического рассеяния света, и уровни $PM_{2,5}$ также измерялись посредством гравиметрического анализа после прокачки образцов через фильтр.

Месторасположение пробоотборников: пробоотборники следует размещать в центре комнаты на высоте около 1,5 м от пола (зона дыхания учеников) (ISO 16000-1 и ISO 16000-34).

Активные пробоотборники и гравиметрический анализ: это рекомендуемый эталонный метод в стандарте ISO 16000-37. Процедуры измерения и основные требования аналогичны условиям, указанным в стандарте EN 12341 для PM_{10} и $PM_{2,5}$, но в ISO 16000-34 допускаются определенные отклонения от стандарта EN 12341; они описаны в разделе 7.1 настоящего документа. Требуются МПО, работающие при скорости постоянного потока 2,3 м³/ч. Системы отбора проб поставляются в продажу несколькими коммерческими производителями по всему миру.

Чтобы минимизировать шум, отбор проб следует проводить с помощью бесшумных МПО. Другим вариантом является размещение насосов в звукоизолирующих ящиках. Принцип эталонного метода заключается в сборе твердых частиц на круглый фильтр. Это должен быть фильтр из стекловолокна (ФСВ), кварцевого волокна (ФКВ), политетрафторэтилена (ПТФЭ) или стекловолокна с покрытием ПТФЭ, прошедший тщательную калибровку до и после отбора проб. Фильтр взвешивается до и после отбора проб.

PM₁₀ или PM_{2,5}, собранные на фильтр (в устройстве с соответствующим входным отверстием для отбора частиц по размеру), также могут быть проанализированы для определения наличия ПЛОС. Более подробную информацию об отборе проб и приборах можно найти в стандартах ISO 16000-37 и EN 12341.

Хранение и обработка проб: до и после экспозиции фильтры должны быть откалиброваны в весовой комнате. Методы калибровки, хранения и транспортировки образцов, а также процедуры ОК/КК подробно описаны в стандарте EN 12341:2014.

Приборы с высоким временным разрешением: эти приборы имеют преимущества по сравнению с гравиметрическим методом: временное разрешение составляет минуты, можно отслеживать пики концентраций, они просты в использовании и предоставляют гораздо больше данных. По всем этим причинам автоматические контрольно-измерительные приборы широко используются для анализа воздуха внутри помещений и считаются дополнительными методами в стандарте ISO 16000-37. Возможность их применения также может рассматриваться для проведения ОК/КК эталонного метода (ISO 16000-37:2019). В стандарте ISO 16000-34 приводится подробное описание приборов, которые следует использовать.

6.2 Неорганические соединения

Неорганические соединения, обычно встречающиеся в помещениях, – это загрязнители атмосферного воздуха NO₂ (см. раздел 5.4.1), O₃ и СО. Помимо проникновения в помещение с атмосферным воздухом O₃ может выделяться при использовании фотокопировальных аппаратов или лазерных принтеров.

6.2.1 O₃

Стандарт ISO для отбора проб и анализа O₃ в воздухе внутри помещений еще не разработан. Методы, описанные в стандартах ISO для измерения O₃ в атмосферном воздухе, предназначены для постоянного измерения. Как и для NO₂, в продаже имеются несколько моделей ППО, а также общее руководство по их выбору и использованию.

Месторасположение пробоотборников: для измерения концентрации O₃ можно использовать протокол измерения концентрации NO₂. Производители дают несколько особых рекомендаций для отбора проб.

Диффузионные пробоотборники: были разработаны различные ППО для измерения концентрации O₃. Аналитические методы зависят от используемого коммерческого пробоотборника. Так, пробоотборники Ogawa, разработанные в Гарвардском университете учеными Koutrakris et al. (46), основаны на окислении нитрита до нитрата под действием O₃. Пробоотборник Radiello®, разработанный Cocheo (47) в Фонде Сальваторе Мауджери, и пробоотборник Passam G®, разработанный Monn & Hangartner (48) в Швейцарском федеральном технологическом институте, основаны на реакции 4,4'-дипиридилэтилена с O₃ с получением 4-пиридилальдегида. Затем 4-пиридилальдегид реагирует с 3-метил-2-бензотиазолинон гидразоном (МБТГ) с получением соответствующего азида. Эти три устройства для отбора проб были успешно

протестированы в анализе воздуха внутри помещений и атмосферного воздуха (12,40,49–52). Более подробную информацию о ППО можно найти в стандартах EN 14412 и EN 13528-3.

Хранение и обработка проб: после экспозиции пробоотборники должны храниться в темноте, а анализ необходимо провести в течение недели после отбора. Конкретные процедуры предоставляются производителями пробоотборников.

Лабораторный анализ: если O_3 улавливается в виде нитрата, этот ион экстрагируется водой Milli-Q® в ультразвуковой ванне и анализируется посредством ионной хроматографии. Аналитическая процедура, аналогичная описанной Ogawa (53), приведена в Методе ID-214 Управления по охране труда и технике безопасности США (OSHA).

Если для сбора O_3 используется 4,4'-дипиридилэтилен, образцы экстрагируются свежеприготовленным раствором МБТГ и фильтруются. Поглощение соответствующего азида измеряется при длине волны 430 нм в УФ-В спектрофотометре. В этом случае образование 4-пиридилальдегида специфично для реакции O_3 , и ни органические загрязнители, ни оксиды азота не мешают определению. Эти методы соответствуют стандартам EN 14412 и EN 13528-3.

6.2.2 CO

Стандарт ISO для отбора проб CO в воздухе внутри помещений еще не разработан. В ранее проведенных исследованиях концентрации CO измерялись как в помещении, так и на открытом воздухе с использованием электрохимического датчика. Как вариант можно использовать отдельные автоматические, портативные, недорогие датчики для постоянного измерения уровней CO. В рамках проекта SINFONIE, например, постоянное измерение концентраций CO проводилось с помощью доступного по цене регистратора (12).

Хотя ППО для измерения уровней CO уже разработаны, они еще не получили широкого распространения. Для измерения в атмосферном воздухе эталонный метод основан на недисперсионном инфракрасном спектроскопическом принципе измерения и является непрерывным (EN 14626:2012). В продаже имеются различные типы автоматических регистраторов для измерения концентраций CO, CO₂, температуры и относительной влажности. Скорость вентиляции воздуха в помещении обычно рассчитывается на основе измерений концентрации CO₂. Подробный протокол отбора проб CO₂ приводится в стандарте ISO 16000-26.

Месторасположение пробоотборников: для измерения концентрации CO можно использовать тот же протокол, что и для измерения концентрации других неорганических соединений.

Автоматические портативные приборы для мониторинга качества воздуха в помещении: имеется несколько коммерческих моделей приборов для измерения концентрации CO. Оборудование поставляется с заводским сертификатом калибровки, но перед использованием его следует проверить с помощью соответствующих калибровочных наборов. В нескольких исследованиях использовался этот тип приборов для мониторинга качества воздуха в школах (54–57).

6.3 ПЛОС

Данный раздел посвящен методам отбора проб и анализа семейств ПЛОС, перечисленных в приложении 2: ПАУ, фталатов, мускусов, БОД, ФОСА и ХП. В целях минимизации затрат,

для сбора ПЛОС можно использовать тот же метод отбора проб и анализа, который описан в стандарте ISO 16000-12 для ПАУ, ПХБ и ПХДД/ПХДФ (фильтр + ППУ-диск и ГХ-МС). Выбранные ПЛОС поддаются мультиостаточному анализу ГХ-МС (36). Однако для некоторых ПЛОС (ПАУ, фталаты и ФОСА) были разработаны специальные протоколы в серии стандартов ISO 16000; они описаны в разделе 5 и ниже.

6.3.1 Фталаты

Подробный протокол отбора проб для анализа содержания фталатов приводится в стандарте ISO 16000-33.

Активные пробоотборники: фталаты можно собирать на сорбционную трубку с Tenax® TA в соответствии со стандартом ISO 16000-6 или в сорбционную трубку, заполненную Florisil® (ISO 16000-33). Сорбционные трубки имеются в продаже или могут быть подготовлены в лаборатории в соответствии с инструкциями, приведенными в стандарте ISO 16000-33. Воздух принудительно подается с помощью насоса для отбора проб. Поток должен составлять 50–20 мл/мин (объем пробы 20–70 л) для сорбционных трубок, заполненных Tenax® TA. Для сорбционных трубок с Florisil® рекомендуется поток 2 л/мин (объем пробы 1–3 м³).

Лабораторный анализ: сорбционные трубки с Tenax® TA экстрагируются методом ТД, а трубки с Florisil® экстрагируются растворителем и анализируются посредством ГХ-МС. Более подробную информацию об аналитическом методе можно найти в стандарте ISO 16000-33.

6.3.2 Мускусы

Рекомендаций относительно метода измерения концентрации мускусов нет ни в стандартах ISO, ни в стандартах EN. В качестве метода может рассматриваться метод, опубликованный в рецензируемых журналах (7,58–60).

Активные пробоотборники: синтетические мускусы чаще всего собирают путем активного отбора проб с диапазоном потока от 2 л/мин до 0,3–0,4 м³/мин (объем пробы 2–100 м³). Возможность отбора проб мускусов в состоянии твердых частиц с использованием МПО и пробоотборников большого объема с СВФ или ФКВ, а в газообразной фазе с использованием ППУ-диска также изучалась. Так, Raffy et al. (7) использовали активный пробоотборник, состоящий из ФКВ, установленного перед ППУ-диском в стеклянной трубке. Воздух прокачивался через устройство с помощью персонального насоса для отбора проб со скоростью 2 л/мин в течение пяти дней подряд.

Скорость потока необходимо проверять до и после отбора проб с помощью внешнего калибратора. Насос можно поместить в звукоизолирующий ящик, чтобы не беспокоить тех, кто находится в классной комнате. В качестве альтернативного варианта отбора проб мускусов можно использовать МПО, как описано в разделе 5.3.1 для ПАУ; при использовании этого метода требуется меньше пробоотборников. Было установлено, что мускусы преобладают в газообразном состоянии (59,60).

Лабораторный анализ: экстракция мускуса из фильтра и ППУ-диска может быть проведена при помощи аппарата Сокслета (или другим методом экстракции) с использованием различных смесей растворителей. Chen et al. (59) использовали аппарат Сокслета с дихлорметаном в течение 72 часов, а Raffy et al. (7) использовали метод жидкостной экстракции под давлением с дихлорметаном. Более подробную информацию о процедурах экстракции и очистки можно найти в ранее упомянутых исследованиях (7,14,59,61).

Во всех упомянутых выше исследованиях мускуса анализ проводился методом ГХ-МС. Melymuk et al. (62) подробно описывают параметры ГХ-МС; в работах Raffy et al. (7) и Mercier et al. (36) содержится подробная информация о газовой хроматографии-тандемной масс-спектрометрии (ГХ-ТМС). Масс-меченные соединения ПАУ успешно использовались в качестве внутренних стандартов при анализе полициклических мускусов в некоторых исследованиях (16,62,63); поэтому п-терфенил-d10 (25 нг) может быть использован в качестве стандарта восстановления, а флуорантен-d10 – в качестве внутреннего стандарта.

6.3.3 БОД

В настоящее время не существует стандартов ISO или EN для выявления БОД в воздухе. Для анализа БОД в воздухе внутри помещений используют пассивный и активный отбор проб. Однако, в связи с описанными выше ограничениями, касающимися ППУ-ППО, и в целях сокращения числа пробоотборников, в данной публикации рассматривается использование только активных пробоотборников.

Активные пробоотборники: эти пробоотборники состоят из СВФ или ФКВ, за которым следует ППУ-диск, как описано выше. В целом, объемы проб в диапазоне от нескольких сотен литров до менее 30 м³ достаточны для достижения низкого внутреннего ПО для большинства соединений. Более низкий ПО может быть достигнут при больших объемах проб (100-385 м³) (14). Таким образом, для анализа БОД также можно использовать МПО, описанные в стандарте ISO 16000-13 и в разделе 5.3.1 для ПАУ.

Другие активные пробоотборники с персональными насосами для отбора проб, например, описанные Raffy et al. (7), успешно используются для сбора ПБДЭ (БДЭ-85, БДЭ-99, БДЭ-100 и БДЭ-119) в школах. Sakhi et al. (64) использовали аналогичный прибор для измерения БДЭ-47, БДЭ-85, БДЭ-99, БДЭ-100, БДЭ-153 и БДЭ-154 со скоростью потока 12 л/мин на протяжении 24 часов.

Лабораторный анализ: несмотря на некоторые недостатки, аппарат Сокслета наиболее часто используется для извлечения БОД из растворителей благодаря высокой эффективности экстракции и надежности (13). Однако используются и другие методы, такие как экстракция растворителем под давлением или экстракция с помощью ультразвука. Типичными растворителями являются дихлорметан, н-гексан, толуол, ацетон или их смесь. Наиболее распространена обработка концентрированной серной кислотой и ряд процедур очистки с использованием различных сорбентов (глинозем, силикагель, Florisil® или их сочетание) (14,64).

Определение БОД обычно проводится с помощью ГХ-МС. Подробности аналитического метода описаны в работах Melymuk et al. (62), Lim et al. (65) и Braouezec et al. (66), а параметры ГХ-МС/МС можно найти в Braouezec et al. (66). Другие детекторы, используемые в связке с газовым хроматографом для количественного определения ПБДЭ, – это масс-спектрометр высокого разрешения (ГХ-МСВР) (65,67) и масс-спектрометр в режиме отрицательной ионизации электронного захвата (ГХ-ОИЭЗ-МС) (68). К обычно используемым внутренним стандартам ПБДЭ относятся 13С-меченые БДЭ-28, БДЭ-47, БДЭ-99, БДЭ-153, БДЭ-183 и БДЭ-209. А к стандартам восстановления – 13С-меченые БДЭ-77 и БДЭ-138 (62,67).

Для выбора аналитической процедуры определения ПБДЭ в различных образцах окружающей среды можно использовать стандарт ISO 22032 и метод 1614А Агентства по охране окружающей среды США (US EPA).

6.3.4 ФОСА

В стандарте ISO 16000-31 приводится подробное описание метода отбора и анализа проб химических веществ, придающих огнеупорные свойства, на основе фосфорорганических соединений – сложных эфиров фосфорной кислоты.

Активные пробоотборники: рекомендуемая система отбора проб для ФОСА подробно описана в ISO 16000-13. ФОСА собирают из воздуха на мелкодисперсный СВФ и ППУ-диск в МПО с потоком 2,7–2,8 м³/ч. Этот пробоотборник также рекомендован для сбора ПАУ в стандарте ISO 16000-12 и описан выше в разделе 5.3.1. Это же пробоотборное устройство можно использовать и для отбора проб остальных ПЛОС (кроме фталатов). Время отбора проб составляет один час, а объем отборанных проб не должен превышать 10% от скорости воздухообмена.

Лабораторный анализ: СВФ и ППУ-диск экстрагируются вместе в аппарате Сокслета при помощи дихлорметана, и анализ проводится с помощью ГХ-МСВР или ГХ-МСНР. Количественное определение соединений проводится с применением внутреннего стандарта.

6.3.5 ХП

ХП — это общий термин для большой группы хлорированных алифатических веществ. Их можно разделить на короткоцепные ХП (КЦХП, С10-13), среднецепные ХП (СЦХП, С14-17) и длинноцепные ХП (ДЦХП, С18-30) в зависимости от длины углеродной цепи. Обычно они применяются в качестве примесей в поливинилхлоридных материалах, огнеупорных добавок в пластике, резине и текстиле; в качестве охлаждающих жидкостей и смазочных материалов в металлообработке; и в качестве пластификаторов в красках, резине и пластике (69).

Активные пробоотборники: та же система отбора проб, которая описана в стандартах ISO 16000-12 для ПАУ (см. раздел 5.3.1) и в ISO 16000-31 для ФОСА, применима и для отбора проб ХП. ХП можно собирать из воздуха на мелкодисперсный фильтр на сорбционной ловушке с ППУ-диском. В литературе описаны и другие МПО (15,64).

Лабораторный анализ: аналитические методы для КЦХП и СЦХП были описаны ранее (15,64,70). ХП, собранные на фильтре или на фильтре с ППУ-диском, извлекаются с помощью различных методик и очищаются на многослойной колонке с силикагелем. Наиболее часто используемой аналитической системой является ГХ-ОИЭЗ-МС, хотя некоторые авторы сообщали об успешном использовании ГХ-МС/МС (15). Более подробную информацию о процедуре отбора проб и анализа ХП в воздухе помещений можно найти в работах Zhou et al. (71) и Huang et al. (17).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Salthammer T, Bahadir M. Occurrence, dynamics and reactions of organic pollutants in the indoor environment. *Clean*. 2009;37:417–36. doi:10.1002/clen.200900015.
2. Wichman J, Lin, T, Nilsson MA-M, Bellander T. PM2.5, soot and NO2 indoor-outdoor relationships at homes, pre-schools and schools in Stockholm, Sweden. *Atmos Environ*. 2010;44:4536–44. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.08.023.
3. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2010 (<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/260127/9789289002134-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, accessed 21 November 2019).
4. Air quality guidelines – global update 2005. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2006 (http://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf, accessed 21 November 2019).
5. Dambruoso PR, de Gennaro G, Loiotile AD, Di Gilio A, Giungato P, Marzocca A et al. School air quality: pollutants, monitoring and toxicity. In: Lichtfouse E, Schwarzbauer J, Robert D, editors. *Pollutant diseases, remediation and recycling. Environmental chemistry for a sustainable world. Volume 4.* Cham: Springer International; 2013.
6. Lucattini L, Poma G, Covaci A, de Boer J, Lamoree MH, Leonards, PEG. A review of semi-volatile organic compounds (SVOCs) in the indoor environment: occurrence in consumer products, indoor air and dust. *Chemosphere*. 2018;201:466–82. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.02.161.
7. Raffy G, Mercier F, Blanchard O, Derbez M, Dassonville C, Bonvallet N et al. Semi-volatile organic compounds in the air and dust of 30 French schools: a pilot study. *Indoor Air*. 2007;27:114–27. doi:10.1111/ina.12288.
8. Burg B, Schreurs R, Linden S, Seinen W, Brouwer A, Sonneveld E. Endocrine effects of polycyclic musks: do we smell a rat? *Int J Androl*. 2008;31:188–93. doi:10.1111/j.1365-2605.2007.00831.x.
9. Rudel RA, Perovich LJ. Endocrine disrupting chemicals in indoor and outdoor air. *Atmos Environ*. 2009;43(1):170–81. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.025.
10. Zhang Y, Dong S, Wang H, Tao S, Kiyama R. Biological impact of environmental polycyclic aromatic hydrocarbons (ePAHs) as endocrine disruptors. *Environ Pollut*. 2016;213:809–24. doi:10.1016/j.envpol.2016.03.050.
11. Методы мониторинга качества воздуха в школьных помещениях. Отчет о совещании. Бонн, Германия. Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ; 2011 г. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/108596/e95417R.pdf?sequence=2&isAllowed=y>, по состоянию на 21 июля 2021 г.).
12. SINPHONIE, Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe. SINPHONIE – Executive summary of the final report. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2014 (<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC91163/lbna26730enn.pdf>, accessed 21 November 2019).

13. Ramalho O, Dassonville C, Mandin C. Campagne nationale de mesure de la qualité de l'air et du confort dans les écoles [National campaign to measure the quality of air and comfort in Schools]. Paris: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)– Indoor Air Quality Observatory (OQAI); 2014 (in French).
14. Garcia-Jares C, Regueiro J, Barro R, Dagnac T, Llompарт M. Analysis of industrial contaminants in indoor air. Part 2. Emergent contaminants and pesticides. *J Chromatogr.* 2009;1216:567–97. doi:10.1016/j.chroma.2008.10.020.
15. Fridén UE, McLachlan MS, Berger U. Chlorinated paraffins in indoor air and dust: Concentrations, congener patterns, and human exposure. *Environ. Inter.* 2011;37: 1169–74. doi:10.1016/j.envint.2011.04.002.
16. Saini A, Okeme JO, Goosey E, Diamond ML. Calibration of two passive air samplers for monitoring phthalates and brominated flame-retardants in indoor air. *Chemosphere.* 2015;137:166–73. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.06.099.
17. Huang H, Gao L, Xia D, Qiao L, Wang R, Su G et al. Characterization of short- and medium-chain chlorinated paraffins in outdoor/indoor PM₁₀/PM_{2.5}/PM_{1.0} in Beijing, China. *Environ Pollut.* 2017;225:674–80. doi:10.1016/j.envpol.2017.03.054.
18. Official Journal of the European Communities. Commission Decision of 12 August 2002 implementing Council Directive 96/23/EC concerning the performance of analytical methods and the interpretation of results. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2002 (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ed928116-a955-4a84-b10a-cf7a82bad858/language-en>, accessed 21 November 2019).
19. Currie LA. Detection and quantification limits: basic concepts, international harmonization, and outstanding (“low-level”) issues. *Appl Radiat Isot.* 2004;61:145–9. doi:10.1016/j.apradiso.2004.03.036.
20. International Union of Pure and Applied Chemistry. Compendium of chemical terminology. Second edition. Oxford: Blackwell Scientific Publications; 1997.
21. Validation of analytical procedures: text and methodology ICH-Q2B. Geneva: International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use (ICH); 1996.
22. Madureira J, Paciencia I, Pereira C, Teixeira JP, Fernandes E de O. Indoor air quality in Portuguese schools: levels and sources of pollutants. *Indoor Air.* 2016;26;526–37. doi:10.1111/ina.12237.
23. Geiss O, Giannopoulos G, Tirendi S, Barrero-Moreno J, Larsen BR. The AIRMEX study – VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data. *J Atmos Environ.* 2011;45:3676–84. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.04.037.
24. Canha N, Mandin C, Ramalho O, Wyart G, Ribéron J, Dassonville C et al. Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air.* 2016;26(3):350–65. doi:10.1111/ina.12222.
25. Villanueva F, Tapia A, Lara S, Amo-Salas M. Indoor and outdoor air concentrations of volatile organic compounds and NO₂ in schools of urban, industrial and rural areas in Central-Southern Spain. *Sci Total Environ.* 2018;622–623:222–35. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.274.

26. Indoor air quality: organic pollutants. Report on a WHO Meeting, Berlin, West, 23–27 August 1987. EURO Reports and Studies No. 111. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 1989.
27. Weschler CJ, Nazaroff WW. SVOC partitioning between the gas phase and settled dust indoors. *Atmos Environ.* 2010;44:3609–20 doi:10.1016/j.atmosenv.2010.06.029.
28. Markovic MZ, Prokop S, Staebler RM, Liggio J, Harner T. Evaluation of the particle infiltration efficiency of three passive samplers and the Ps-1 active air sampler. *Atmos Environ.* 2015;112:289–93. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.04.051.
29. Gouin T, Harner T, Blanchard P, Mackay D. Passive and active air samplers as complementary methods for investigating persistent organic pollutants in the Great Lakes basin. *Environ Sci Technol.* 2005;39:9115–22. doi:10.1021/es051397f.
30. Harner T, Pozo K, Gouin T, Macdonald AM, Hung H, Cainey et al. Global pilot study for persistent organic pollutants (POPs) using PUF disk passive air samplers. *Environ Pollut.* 2006;144:445–52. doi:10.1016/j.envpol.2005.12.053.
31. Bohlin P, Audy O, Škrdlíková L, Kukučka P, Vojta Š, Přibylová P et al. Evaluation and guidelines for using polyurethane foam (PUF) passive air samplers in double-dome chambers to assess semi-volatile organic compounds (SVOCs) in non-industrial indoor environments. *Environ Sci Process Impacts.* 2014;16(11):2617–26. doi:10.1039/c4em00305e.
32. Wilford BH, Harner T, Zhu J, Shoeib M, Jones KC. Passive sampling survey of polybrominated diphenyl ether flame retardants in indoor and outdoor air in Ottawa, Canada: implications for sources and exposure. *Environ Sci Technol.* 2004;38(20):5312–18. doi:10.1021/es049260x.
33. Hazrati S, Harrad S. Calibration of polyurethane foam (PUF) disk passive air samplers for quantitative measurement of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): Factors influencing sampling rates. *Chemosphere.* 2007;67:448–55. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.09.091.
34. Vykoukalová M, Venier M, Vojta S, Melymuk L, Becanova J, Romanak K et al. Organophosphate esters flame retardants in the indoor environment. *Environ Int.* 2017;106:97–104. doi:10.1016/j.envint.2017.05.020.
35. Okeme JO, Yang C, Abdollahi A, Dhal S, Harris SA, Jantunen LM et al. Passive air sampling of flame retardants and plasticizers in Canadian homes using PDMS, XAD-coated PDMS and PUF samplers. *Environ Pollut.* 2018;239:109–17. doi:10.1016/j.envpol.2018.03.103.
36. Mercier F, Gilles E, Saramito G, Glorennec P, Le Bot B. A multi-residue method for the simultaneous analysis in indoor dust of several classes of semi-volatile organic compounds by pressurized liquid extraction and gas chromatography/tandem mass spectrometry. *J Chromatogr A.* 2014;1336:101–11. doi:10.1016/j.chroma.2014.02.004.
37. Villanueva F, Sevilla G, Lara S, Martín P, Salgado S, Albaladejo J et al. Application of gas chromatography coupled with tandem mass spectrometry for the assessment of PAH levels in non industrial indoor air. *J Microchem.* 2018;142:117–25. doi:10.1016/j.microc.2018.06.021.

38. Hafkenscheid T, Fromage-Mariette A, Goelen E, Hangartner M, Pfeffer U, Plaisance H et al. Review of the application of diffusive samplers in the European Union for the monitoring of nitrogen dioxide in ambient air. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2009 ([https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC51106/reqno_jrc51106_eur_23793.pdf\[1\].pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC51106/reqno_jrc51106_eur_23793.pdf[1].pdf), accessed 21 November 2019).
39. Stranger M, Potgieter-Vermaak SS, Van Grieken R. Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium. *Indoor Air*. 2008;18:454–63. doi:10.1111/j.1600-0668.2008.00545.x.
40. Martin P, Cabañas B, Villanueva F, Gallego MP, Colmenar I, Salgado S. Ozone and Nitrogen Dioxide Levels Monitored in an Urban Area (Ciudad Real) in central-southern Spain. *Water Air Soil Pollut*. 2010;208:305–16. doi:10.1007/s11270-009-0168-8.
41. Demirel G, Özden O, Döğeroğlu T, Gaga EO. Personal exposure of primary school children to BTEX, NO₂ and ozone in Eskişehir, Turkey: relationship with indoor/ outdoor concentrations and risk assessment. *Sci Total Environ*. 2014;473–474:537–48. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.12.034.
42. Pegas PN, Alves CA, Evtugina MG, Nunes T, Cerqueira M, Franchi M et al. Seasonal evaluation of outdoor/indoor air quality in primary schools in Lisbon. *J Environ Monit*. 2011;13:657–67. doi:10.1039/c0em00472c.
43. Ozden O, Dogeroglu T. Field evaluation of a tailor-made new passive sampler for the determination of NO₂ levels in ambient air. *Environ Monit Assess*. 2008;142:243–53. doi:10.1007/s10661-007-9921-x.
44. User manual 2019 for Radiello® sampler. Version 1/2003. Vigonza: Fondazione Salvatore Maugeri; 2003 (<https://www.restek.com/pdfs/radiello-manual.pdf>, accessed 21 November 2019).
45. Whalley J, Zandi S. Particulate matter sampling techniques and data modelling methods. In: Sallis P, editor. *Air quality: measurement and modeling*. Rijeka: IntechOpen; 2016:29–53.
46. Koutrakis P, Wolfson JM, Bunyaviroch A, Froehlich SE, Hirano K, Mulik JD. Measurement of ambient ozone using a nitrite-coated filter. *Anal Chem*. 1993;65(3):209–14. doi:10.1021/ac00051a004.
47. Cocheo V. Short and long time exposure ozone passive sampling by means of Radiello. In: Cocheo V, De Saeger E, Kotzias D, editors. *International Conference on Air quality in Europe. Challenges for the 2000's*. Venice, Italy. 1999:174.
48. Monn C, Hangartner M. Passive sampling for ozone. *J Air Waste Manage Assoc*. 1990;40(3):357–8. doi:10.1080/10473289.1990.10466694.
49. Sanz MJ, Calatayud V, Sánchez-Peña G. Measures of ozone concentrations using passive sampling in forests of South Western Europe. *Environ Pollut*. 2007;145:620–8. doi:10.1016/j.envpol.2006.02.031.
50. Bozkurt Z, Doğan G, Arslanbaş D, Pekey B, Pekey H, Dumanoğlu Y et al. Determination of the personal, indoor and outdoor exposure levels of inorganic gaseous pollutants in different microenvironments in an industrial city. *Environ Monit Assess*. 2015;187:590. doi:10.1007/s10661-015-4816-8.

51. Finco A, Marzuoli R, Chiesa M, Gerosa G. Ozone risk assessment for an Alpine larch forest in two vegetative seasons with different approaches: comparison of POD1 and AOT40. *Environ Sci Pollut Res*. 2017;24:26238–48. doi:10.1007/s11356-017-9301-1.
52. Grivas G, Dimakopoulou K, Samoli E, Papakosta D, Karakatsani A, Katsouyanni K et al. Ozone exposure assessment for children in Greece – results from the RESPOZE study. *Sci Total Environ*. 2017;581–582:518–29. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.159.
53. Ogawa & Co. Protocol for ozone measurement using the ozone passive sampler badge. Cambridge: Harvard School of Public Health: 2001 (<http://ogawausa.com/wp-content/uploads/2014/04/proozone.pdf>, accessed 21 November 2019).
54. Pegas PN, Alves CA, Nunes T, Bate-Epey EF, Evtyugina M, Pio CA. Could houseplants improve indoor air quality in schools? *J Toxicol Environ Health A*. 2012;75(22–23): 1371–80. doi:10.1080/15287394.2012.721169.
55. Chithra VS, Shiva Nagendra SM. Indoor air quality investigations in a naturally ventilated school building located close to an urban roadway in Chennai, India. *Build Environ*. 2012;54:159–67. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.016.
56. Yang W, Sohn J, Kim J, Son B, Park J. Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *J Environ Manag*. 2009;90:348–54. doi:10.1016/j.jenvman.2007.10.003.
57. Chaloulakou A, Mavroidis I. Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school. Evaluation of an indoor air quality model. *Atmos Environ*. 2002;36:1769–81. doi:10.1016/S1352-2310(02)00151-6.
58. Blanchard O, Glorennec P, Mercier F, Bonvallot N, Chevrier C, Ramalho O et al. Semivolatile organic compounds in indoor air and settled dust in 30 French dwellings. *Environ Sci Technol*. 2014;48:3959–69. doi:10.1021/es405269q.
59. Chen D, Zeng X, Sheng Y, Bi X, Gui H, Sheng G et al. The concentrations and distribution of polycyclic musks in a typical cosmetic plant. *Chemosphere*. 2007;66:252. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.05.024.
60. Kallenborn R, Gatermann R, Planting S, Rimkus GG, Lund M, Schlabach M et al. Gas chromatographic determination of synthetic musk compounds in Norwegian air samples. *J Chromatogr A*. 1999;846:295–306. doi:10.1016/S0021-9673(99)00259-9.
61. Sofuoglu A, Kiyimet N, Kavcar P, Sofuoglu SC. Polycyclic and nitro musks in indoor air: a primary school classroom and a women's sport center. *Indoor Air*. 2010;20:515–22. doi:10.1111/j.1600-0668.2010.00674.x.
62. Melymuk L, Robson M, Helm PA, Diamond ML. Evaluation of passive air sampler calibrations: Selection of sampling rates and implications for the measurement of persistent organic pollutants in air. *Atmos Environ*. 2011;45:1867–75. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.01.011.
63. Okeme JO, Saini A, Yang C, Zhu J, Smedes F, Klanova J et al. Calibration of polydimethylsiloxane and XAD-pocket passive air samplers (PAS) for measuring gas- and particle-phase SVOCs indoors. *Atmos Environ*. 2016;143:202–8. doi:10.1016/j.envpol.2018.03.103.
64. Sakhi AK, Cequier E, Becher R, Bølling AK, Borgen AR, Schlabach M et al. Concentrations of selected chemicals in indoor air from Norwegian homes and schools. *Sci Total Environ*. 2019;674:1–8. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.086.

65. Lim YW, Kim HH, Lee CS, Shin DC, Chang YS, Yang JY. Exposure assessment and health risk of poly-brominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants in the indoor environment of elementary school students in Korea. *Sci Total Environ.* 2014;470–471: 1376–89. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.09.013.
66. Braouezec C, Enriquez B, Blanchard M, Chevreuril M, Tell MJ. Cat serum contamination by phthalates, PCBs, and PBDEs versus food and indoor air. *Environ Sci Pollut Res.* 2016;23:9574–84. doi:10.1007/s11356-016-6063-0.
67. Melymuk L, Bohlin-Nizzetto P, Vojta S, Kratka M, Kukucka P, Audy O et al. Distribution of legacy and emerging semivolatile organic compounds in five indoor matrices in a residential environment. *Chemosphere.* 2016;153:179–86. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.03.012.
68. Ding N, Wang T, Chen SJ, Yu M, Zhu ZC, Tian M et al. Brominated flame retardants (BFRs) in indoor and outdoor air in a community in Guangzhou, a megacity of southern China. *Environ Pollut.* 2016;212:457–63. doi:10.1016/j.envpol.2016.02.038.
69. Van Mourik LM, Gaus C, Leonards PEG, de Boer J. Chlorinated paraffins in the environment: a review on their production, fate, levels and trends between 2010 and 2015. *Chemosphere.* 2016;155:415–28. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.04.037.
70. Zhuo M, Ma S, Li G, Yu Y, An T. Chlorinated paraffins in the indoor and outdoor atmospheric particles from the Pearl River Delta: characteristics, sources, and human exposure risks. *Sci Total Environ.* 2019;650:1041–9. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.107.
71. Zhou W, Shen M, Lam JCW, Zhu M, Liu L, Chen H, Du B et al. Size-dependent distribution and inhalation exposure characteristics of particle-bound chlorinated paraffins in indoor air in Guangzhou, China. *Environ Int.* 2018;121:675–82. doi:10.1016/j.envint.2018.10.004.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СПИСОК ПРИОРИТЕТНЫХ ХИМИКАТОВ, ВКЛЮЧЕННЫХ В ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СКРИНИНГОВОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Номер	Группа химических веществ	Вещество	Номер химической реферативной службы (CAS)	
1	Кислородсодержащие летучие органические соединения	Альдегиды	Формальдегид	50-00-0
2			Ацетальдегид	75-07-0
3	Летучие органические соединения (ЛОС)	Ароматические углеводороды	Бензол	71-43-2
4			Этилбензол	100-41-4
5			(О-, м-, п-)ксилол	95-47-6
				108-38-3/106-42-3
6			Стирол	100-42-5
7			Толуол	108-88-3
8			1,2, 3-триметилбензол	526-73-8
9			1,4-дихлорбензол	106-46-7
10			Эфиры	Бутилацетат
11		Терпены	Лимонен	138-86-3
12	α-пинен		80-56-8	
13	Хлорированные углеводороды	Тетрахлорэтилен	127-18-4	
14		Трихлорэтилен	79-01-6	
15	Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)	Нафталин	91-20-3	
16	Полулетучие органические соединения ПЛОС	ПАУ	Бенз(а)пирен	50-32-8
17	Неорганические соединения	Диоксид азота (NO ₂)	NO ₂	10102-44-0

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ДРУГИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ ВОЗДУХА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ОБЕСПОКОЕННОСТЬ

Номер	Группа химических веществ	Вещества
1	Твердые частицы	Твердые частицы с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм (PM ₁₀)
2		Твердые частицы с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм (PM _{2,5})
3	Неорганические соединения	Оксид углерода (СО)
4		Озон (O ₃)
5	Фталаты	Диэтилфталат (ДЭФ)
6		Диизобутилфталат (ДИБФ)
7		Ди-н-бутилфталат (ДНБФ)
8	Мускусы	Галаколид
9		Тоналид
10	ПАУ	Аценафтен
11		Аценафтилен
12		Фенантрен
13		Антрацен
14		Бенз[а]антрацен
15		Бензо[б]флуорантен
16		Бензо[<i>j</i>]флуорантен
17		Бенз[е]пирен
18		Бензо[ghi]перилен
19		Бензо[к]флуорантен
20		Хризен
21		Дибенз[а, h]антрацен
22		Дибензо[а, i]пирен
23		Флуорантен
24		Флуорен
25		Индено[1,2,3- <i>cd</i>]пирен
26	Пирен	
27	Бромированные огнестойкие добавки БОД – полибромированные дифениловые эфиры (ПБДЭ)	2,4,4'-трибромдифениловый эфир (БДЭ-28)
28		2,2',4,4'-тетрабромдифениловый эфир (БДЭ-47)
29		2,2',4,4',5-пентабромдифениловый эфир (БДЭ-99)
30		2,2',4,4',6-пентабромдифениловый эфир (БДЭ-100)
31		2,2',4,4',5,5'-гексабромдифениловый эфир (БДЭ-153)
32		2,2',3,4,4',5',6-гептабромдифениловый эфир (БДЭ-183)
33		2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-декабромдифениловый эфир (БДЭ-209)
34		1,2-дибром-4-(1,2-дибромэтил)циклогексан (ДБЭ-ДБЦГ)

Номер	Группа химических веществ	Вещества
35	Фосфорорганические антипирены (ФОСА)	Трибутилфосфат (ТБФ)
36		Трис(2-бутоксипропил)фосфат (ТБЭФ)
37		Трис(1-хлорпропан-2-ил)фосфат (ТХПФ)
38		Трис(2-хлорэтил)фосфат (ТХЭФ)
39	Хлорированные парафины (ХП)	Короткоцепные ХП (КЦХП) (С10-13)
40		Среднецепные ХП (СЦХП) (С14-17)
41		Длинноцепные ХП (ДЦХП) (С18-30)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ МЕТОДОВ

1. ASTM D1607-91(2005). Стандартный метод испытания на содержание диоксида азота в атмосфере (реакция Грисса-Зальцмана)
2. EPA Method TO-15, 1999. Компендиум методов определения токсических органических соединений в атмосферном воздухе – второе издание компендиума методов TO-15. Определение летучих органических соединений (ЛОС) в воздухе, собранном в специально подготовленные канистры
3. EPA Method 1614A, 2010. Определение бромированных дифениловых эфиров в воде, почве, отложениях и тканях методом ГХВП/МСВП
4. NIOSH 6700. Определение диоксида азота (при помощи диффузионного пробоотборника)
5. ISO 5725. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений
6. ISO 5725-1:1994. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений – часть 1: общие принципы и определения
7. ISO 5725-3:1994. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений – часть 3: промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений
8. ISO 6768:1998. Воздух атмосферный. Определение концентрации по массе диоксида азота. Модифицированный метод Грисса-Зальцмана
9. ISO 12884:2000. Воздух атмосферный. Определение общей концентрации полициклических ароматических углеводородов (в газовом состоянии и в виде твердых частиц) - Сбор на фильтрах с сорбентом с газохроматографическим/масс-спектрометрическим анализом
10. ISO 13964:1998. Качество воздуха. Определение содержания озона в окружающем воздухе. Метод с применением ультрафиолетовой фотометрии
11. ISO 16000-1:2004. Воздух внутри помещений – часть 1: общие положения отбора проб
12. ISO 16000-2:2004. Воздух внутри помещений – часть 2: методология отбора проб формальдегида
13. ISO 16000-3:2011. Воздух внутри помещений – часть 3: определение формальдегида и других карбонильных соединений в воздухе помещений и воздухе испытательной камеры путем активного метода отбора проб
14. ISO 16000-4:2011. Воздух внутри помещений – часть 4: определение формальдегида методом диффузионного отбора проб
15. ISO 16000-5:2007. Воздух внутри помещений – часть 5: методология отбора проб летучих органических соединений

16. ISO 16000-6:2011. Воздух внутри помещений – часть 6: определение летучих органических соединений в воздухе внутри помещений и испытательной камеры путем активного отбора проб на сорбент Tenax TA с последующей термической десорбцией и газохроматографическим анализом с использованием МС или МС/ПИД
17. ISO 16000-12:2008. Воздух внутри помещений – часть 12: методология отбора проб полихлордифенилов (ПХБ), полихлорированных дибензо-п-диоксинов (ПХДД), полихлорированных дибензофуранов (ПХБФ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ)
18. ISO 16000-13:2008. Воздух внутри помещений – часть 13: определение общего содержания полихлорированных диоксиноподобных бифенилов (ПХБ) и полихлорированных дибензо-пара-диоксинов/дибензофуранов (ПХДД/ПХДФ) (в газообразном состоянии и в виде твердых частиц). Отбор проб на фильтр и сорбент
19. ISO 16000-15:2008. Воздух внутри помещений – часть 15: методология отбора проб диоксида азота (NO₂)
20. ISO 16000-26:2012. Воздух внутри помещений – часть 26: методология отбора проб диоксида углерода (CO₂)
21. ISO 16000-31:2014. Воздух внутри помещений – часть 31: измерение добавок, придающих огнеупорные свойства, и пластификаторов на основе фосфорорганических соединений. Сложные эфиры фосфорной кислоты
22. ISO 16000-33:2017. Воздух внутри помещений – часть 33: определение содержания фталатов методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии (ГХ/МС)
23. ISO 16000-34:2018. Воздух внутри помещений – часть 34: методология определения содержания твердых частиц
24. ISO 16000-37:2019. Воздух внутри помещений – часть 37: измерение массовой концентрации PM_{2,5}
25. ISO 16017-1:2000. Воздух атмосферный, рабочей зоны и замкнутых помещений. Отбор проб летучих органических соединений при помощи сорбционной трубки с последующей термодесорбцией и газохроматографическим анализом на капиллярных колонках – часть 1: отбор проб методом прокачки
26. ISO 16017-2:2003. Воздух атмосферный, рабочей зоны и замкнутых помещений: отбор проб летучих органических соединений при помощи сорбционной трубки с последующей термодесорбцией и газохроматографическим анализом на капиллярных колонках – часть 2: метод диффузионного отбора проб
27. ISO 16362:2005. Воздух атмосферный – определение содержания полициклических ароматических углеводородов в виде твердых частиц методом высокоэффективной жидкостной хроматографии
28. ISO 22032:2006. Качество воды – определение некоторых полибромированных дифениловых эфиров в отстое и осадках сточных вод. Метод с использованием экстракции и газовой хроматографии/масс-спектрометрии
29. EN 12341:2014. Воздух атмосферный – стандартный гравиметрический метод измерения для определения массовой концентрации твердых частиц PM_{2,5} или PM_{2,5}

30. EN 13528-2:2003. Качество атмосферного воздуха – диффузионные пробоотборники, используемые при определении содержания газов и паров. Требования и методы испытаний – часть 2: особые требования и методы испытаний
31. EN 13528-3:2003. Качество атмосферного воздуха – диффузионные пробоотборники, используемые при определении содержания газов и паров. Требования и методы испытаний – часть 3: руководство по выбору, использованию и техническому обслуживанию
32. EN 14211:2012. Атмосферный воздух – стандартный метод измерения концентрации диоксида азота и монооксида азота методом хемилюминесценции
33. EN 14412:2005. Качество воздуха внутри помещений – диффузионные пробоотборники, используемые при определении содержания газов и паров. Руководство по выбору, использованию и техническому обслуживанию
34. EN 14662-2:2005. Качество атмосферного воздуха – стандартный метод измерения концентрации бензола – часть 2: отбор проб методом прокачки с последующей десорбцией растворителем и анализом методом газовой хроматографии
35. EN 14662-5:2005. Качество атмосферного воздуха – стандартный метод измерения концентрации бензола – часть 5: диффузионный отбор проб с последующей десорбцией растворителем и анализом методом газовой хроматографии
36. EN 838:2010. Воздух рабочей зоны. Диффузионные пробоотборники, используемые при определении содержания газов и паров. Требования и методы испытаний
37. EN 14625:2012. Атмосферный воздух – стандартный метод измерения концентрации озона на основе фотометрии в ультрафиолетовой области спектра
38. EN 14626:2013. Атмосферный воздух – стандартный метод измерения концентрации оксида углерода методом недисперсионной инфракрасной спектроскопии
39. EN 16339:2013. Атмосферный воздух – стандартный метод определения концентрации диоксида азота с использованием диффузионного отбора проб
40. OSHA Method ID-214. Озон в воздухе рабочей зоны (фильтр из пропитанного стекловолокна) 2008.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. РЕЗЮМЕ МЕТОДОВ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИЗА ХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВОЗДУХА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

В данном разделе приводится резюме методов отбора и анализа проб наиболее часто встречающихся химических загрязнителей в воздухе помещений детских учреждений (школы, детские сады и центры дневного ухода), определенных Европейским региональным бюро ВОЗ. При этом не преследуется цель предоставить исчерпывающий перечень методов отбора и анализа проб, а задача заключается в том, чтобы определить устоявшиеся методы, рекомендованные Международной организацией по стандартизации (ISO) или Европейским комитетом по стандартизации.

В данном разделе также представлены методы отбора и анализа проб, опубликованные в рецензируемых журналах. Хотя эти методы широко используются в исследованиях качества воздуха в помещениях, они не стандартизированы; однако они отличаются определенными преимуществами, такими как простота проведения и низкая стоимость. Например, пенополиуретановый диск на пассивном пробоотборнике воздуха (ППУ-ППО) успешно использовался для сбора ряда соединений, таких как ПБДЭ, в нескольких исследованиях.

Методы отбора и анализа проб суммированы в таблице 4 ниже. В нее включены стандартные методы отбора проб и анализа кислородсодержащие ЛОС (альдегидов) и ЛОС с использованием пассивного или активного отбора проб, термической десорбции (ТД) или десорбции растворителем (ДР) и газовой хроматографии-масс-спектрометрии/пламенно-ионизационного детектора (ГХ-МС/ПИД). В таблице также приведены ссылки на стандартные методы измерения бензола в атмосферном воздухе, а также других ЛОС в воздухе внутри помещений и снаружи.

Для ПАУ предлагаемый метод включает процедуру отбора проб, рекомендованную в стандарте ISO 16000-12, с использованием малообъемного пробоотборника (МПО) (фильтр плюс ППУ-диск), описанного в стандарте ISO 16000-13. Это устройство также рекомендовано использовать для обнаружения диоксиноподобных ПХБ и ПХДД/ПХДФ в стандарте ISO 16000-12 и ФОСА – в ISO 16000-31. Этот МПО может быть использован для сбора остальных ПЛОС (мускусы, ПБДЭ и ХП).

В таблице приведены стандартные методы отбора и анализа проб PM_{10} и $PM_{2,5}$ с помощью МПО и гравиметрического анализа, включая метод прямого считывания, который широко используется и включен в стандарт ISO 16000-37 в качестве дополнительного метода с высоким временным разрешением.

Наконец, в таблице представлены отдельные методы отбора проб и анализа неорганических соединений – NO_2 , СО и O_3 – в воздухе внутри помещений. Также включены стандартные методы, основанные на непрерывных измерениях, рекомендованные в Европейских нормативных документах (EN) для атмосферного воздуха, и методы, основанные на пассивном отборе проб. Они широко используются для измерения концентраций неорганических соединений в воздухе внутри и снаружи помещений.

Таблица 4. Методы отбора проб и проведения анализа загрязнителей воздуха внутри помещений

Метод отбора и/или анализа проб (название)	Прибор для отбора проб	Аналитический метод	Применение метода (ссылки)
Альдегиды (формальдегид и ацетальдегид) в газовом состоянии			
ISO 16000-2	Методология отбора проб формальдегида	-	-
ISO 16000-4	Определение формальдегида в воздухе внутри помещений	Диффузионный пробоотборник (2,4-ДНФГ)	Geiss et al., 2011 (1) Madureira et al., 2016 (2) Canha et al., 2016 (3) Villanueva et al., 2018 (4)
ISO 16000-3	Определение формальдегида и других карбонильных соединений	Активный пробоотборник (2,4-ДНФГ)	Chiappini et al., 2011 (5)
Ароматические углеводороды¹, терпены², эфиры³, хлорированные углеводороды⁴, алканы⁵, полиароматические углеводород (нафталин) в газовом состоянии			
ISO 16000-5	Методология отбора проб летучих органических соединений	-	-
ISO 16017-2	Отбор проб и анализ летучих органических соединений при помощи сорбционной трубки/термодесорбции/газохроматографического анализа на капиллярных колонках. Часть 2: диффузионный метод отбора проб	Диффузионный пробоотборник (Tenax, графитизированный уголь)	Cipolla et al., 2017 Zhong et al., 2017 Faber et al., 2015 de Gennaro et al., 2014 Zhu et al., 2013 de Gennaro et al., 2013 Geiss et al., 2011
ISO 16017-1	Отбор проб и анализ летучих органических соединений при помощи сорбционной трубки/термодесорбции/газохроматографического анализа на капиллярных колонках. Часть 1: отбор проб методом прокачки	Активный пробоотборник (PSP) (Tenax, графитизированный уголь)	-
ISO 16000-6	Определение ЛОС в воздухе замкнутых помещений и испытательной камеры путем активного отбора проб на сорбент Tenax TA с последующей термической десорбцией и газохроматографическим анализом с использованием МС или МС-ПИД	Активный пробоотборник (PSP) (Tenax, TA(R))	Kalimeri et al., 2016 Mishra et al., 2015 Sofuoglu et al., 2011 Hoang et al., 2017

¹ Бензол, этилбензол, ксилолы (о-, м-, п-), стирол, толуол, 1,2,3-триметилбензол, 1,4-дихлорбензол.

² Лимонен, α-пинен.

³ Бутилацетат.

⁴ Тетрахлорэтилен, трихлорэтилен.

⁵ Н-Гептан, н-декан.

* ОИЗЗ: отрицательная ионизация электронного захвата; МСВР: масс-спектрометрия высокого разрешения; МСНР: масс-спектрометрия низкого разрешения; ФКВ: фильтр из кварцевого волокна.

Таблица 4 (продолжение)

Метод отбора и/или анализа проб (название)	Прибор для отбора проб	Аналитический метод	Применение метода (ссылки)
Ароматические углеводороды¹, терпены², эфиры³, хлорированные углеводороды⁴, алканы⁵, полиароматический углеводород (нафталин) в газовом состоянии			
EN 14662-2 ¹	Качество атмосферного воздуха - стандартный метод измерения концентраций бензола - часть 2: отбор проб методом прокачки с последующей десорбцией растворителем и газохроматографическим анализом	Активный пробоотборник (активированный уголь)	Десорбция растворителем-ГХ-МС/ПВД
EN 14662-5 ¹	Качество атмосферного воздуха - стандартный метод измерения концентраций бензола - часть 5: отбор проб диффузионным методом с последующей десорбцией растворителем и газохроматографическим анализом	Диффузионный пробоотборник (активированный уголь)	Десорбция растворителем-ГХ-МС/ПВД Pegas et al., 2011 (16) Norbäck et al., 2017 (17) Demirel et al., 2014 (18) Villanueva et al., 2018 (4)
EPA-TO15	Канистры и хроматографическое разделение	Активный пробоотборник	ГХ-МС Wang et al., 2016 (19)
ПАУ (нафталин и бензо(а)пирен) в газовом состоянии и в виде твердых частиц			
ISO 16000-12	Воздух внутри помещений - часть 12: стратегия отбора проб ПХБ, ПХДД, ПХДФ и ПАУ	Активный пробоотборник (МПО, рекомендуемый в ISO 16000-13))	- Oliveira et al., 2015 (20)
ISO 12884	Атмосферный воздух - определение общего содержания полициклических ароматических углеводородов (в газообразном состоянии и в виде твердых частиц) - отбор проб на фильтр и сорбент с последующим анализом методом ГХ-МС	-	ГХ-МС -
ISO 16362	Атмосферный воздух - определение содержания полициклических ароматических углеводородов в виде твердых частиц методом ВЭЖХ	-	ВЭЖХ -
Публикация в рецензируемом журнале	Сбор на ФКВ и ППУ-диск персональным насосом для отбора проб	Активный пробоотборник (PSP) (Tenax, TA(R))	ГХ-МС/МС Raffy et al., 2017 (21)
Фталаты: ДЭФ, ДИБФ, ДНБФ в основном в газообразном состоянии			
ISO 16000-33	Определение содержания фталатов методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии (ГХ/МС)	Активный пробоотборник	ТД-ГХ-МС Kang et al., 2005 (22) Sakhi et al., 2019 (23)

¹ Бензол, этилбензол, ксилолы (о-, м-, п-), стирол, толуол, 1,2,3-триметилбензол, 1,4-дихлорбензол.

² Лимонен, α-пинен.

³ Бутилацетат.

⁴ Тетрахлорэтилен, трихлорэтилен.

⁵ н-Гептан, н-декан.

¹ Методология десорбции растворителем может также использоваться для анализа остальных ЛОС.

Таблица 4 (продолжение)

Метод отбора и/или анализа проб (название)	Прибор для отбора проб	Аналитический метод	Применение метода (ссылки)
Полициклические мускусы: галаколид (ННСВ) и тоналид (АНТН) в газообразном состоянии и в виде твердых частиц			
ISO 16000-13 (только для системы отбора проб) ⁱⁱ	Определение общего содержания (в газовом состоянии и в виде твердых частиц) ПХБ и ПХДД/ПХДФ - отбор проб на фильтр и сорбент	Активный пробоотборник ГХ-МС/МС	Fontal et al., 2016 (24)
Публикации в рецензируемом журнале	Сбор на ФКВ и ППУ-диск персональным насосом для отбора проб	Активный пробоотборник ГХ-МС/МС	Raffy et al., 2017 (21)
БОД-ПБДЭ: БДЭ-28, БДЭ-47, БДЭ-99, БДЭ-100, БДЭ-153, БДЭ-183, БДЭ-209, ДБЭ-ДБЦГ в газовом состоянии и в виде твердых частиц			
ISO 16000-13 (только для системы отбора проб) ⁱⁱ	Определение общего содержания (в газовом состоянии и в виде твердых частиц) ПХБ и ПХДД/ПХДФ - отбор проб на фильтр и сорбент	Активный пробоотборник ГХ-ОИЭЗ*-МС	Melymuk et al., 2011 (25)
Публикации в рецензируемых журналах	Сбор на ФКВ и ППУ-диск персональным насосом для отбора проб	Активный пробоотборник ГХ-МС/МС	Sakhi et al., 2019 (23) Raffy et al., 2017 (21)
ППО-ППУ	Сбор на ППО с ППУ-диск	Диффузный пробоотборник ГХ-МС	Saini et al., 2015 (26) Wilford et al., 2004 (27) Melymuk et al., 2016 (28)
ФОСА: ТБФ, ТБЭФ, ТХПФ, ТХЭФ в газовом состоянии и в виде твердых частиц			
ISO 16000-31	Измерение добавок, придающих огнеупорные свойства, и пластификаторов на основе фосфорорганических соединений. Сложные эфиры фосфорной кислоты	Активный пробоотборник ГХ-МСВР* (МПО, рекомендуемый в ISO 16000-13)	-
ХП: КЦХП, СЦХП, ДЦХП в газовом состоянии и в виде твердых частиц			
ISO 16000-13 (только для системы отбора проб) ⁱⁱ	Определение общего содержания (в газовом состоянии и в виде твердых частиц) ПХБ и ПХДД/ПХДФ - отбор проб на фильтр и сорбент	-	Sakhi et al., 2019 (23)
Публикации в рецензируемых журналах	Сбор на ФКВ и ППУ-диск персональным насосом для отбора проб	ГХ-МС/МС ГХ-ОИЭЗ-МС	Huang et al., 2017 (29) Fridén et al., 2011 (30)

ⁱⁱ В стандартах ISO или EN нет отдельных рекомендаций относительно мускусов, БОД или ХП, но для их сбора можно использовать систему отбора проб, рекомендованную для ПАУ в стандарте ISO 16000-12 и описанную в стандарте ISO 16000-13.

* ОИЭЗ: отрицательная ионизация электронного захвата; МСВР: масс-спектрометрия высокого разрешения; МСНР: масс-спектрометрия низкого разрешения; ФКВ: фильтр из кварцевого волокна.

Таблица 4 (продолжение)

Метод отбора и/или анализа проб (название)	Прибор для отбора проб	Аналитический метод	Применение метода (ссылки)
Твердые частицы (PM_{2,5} и PM₁₀)			
ISO 16000-34	Методология определения содержания твердых частиц	-	-
ISO 16000-37	Методология измерения массовой концентрации PM _{2,5}	Гравиметрический анализ-микровесы	Vicente et al., 2017 (31) Blaszczuk et al., 2017 (32) Fromme et al., 2008 (33) Alves et al., 2013 (34)
Прямое считывание Дополнительный метод высокого временного разрешения (ISO 16000-34)	Мониторинг частиц в реальном времени	-	Branco et al., 2014 (35) Madureira et al., 2016 (2) Mathew et al., 2015 (36)
Неорганические соединения в газовом состоянии: диоксид азота (NO₂)			
ISO 16000-15	Методология отбора проб NO ₂	-	-
ISO 6768	Определение концентрации по массе NO ₂ -модифицированный метод Грисса-Зальцмана	УФ-В* спектрофотометр	Demirel et al., 2014 (18)
EN 16339	Определение концентрации NO ₂ методом диффузионного отбора проб	УФ-В спектрофотометр ионная хроматография	Villanueva et al., 2018 (4) Hafkenscheid et al., 2009 (37)
ASTM D1607-91	Стандартный метод тестирования содержания NO ₂ в атмосфере (реакция Грисса-Зальцмана)	УФ-В спектрофотометр	-
EN 14211	Стандартный метод измерения концентрации NO ₂ при помощи хемилюминесценции	Химилюминесценция	Tolis et al., 2018 (38)
Неорганические соединения в газовом состоянии: озон (O₃)			
метод МБТГ ⁶ Согласно EN 14412 и 13528-3	Озон (O ₃)-4,4'-дипиридилэтилен (метод МБТГ)	УФ-В спектрофотометр	Maugerl, 2003 (52) Ogawa & Co., 2001 (53) Sanz et al., 2007 (39) Martin et al., 2010 (40) Bozkurt et al., 2015 (41) Finco et al., 2017 (42) SINPHONIE project (43)

⁶ 3-метил-2-бензотиазолинон гидразон.⁷ Ультрафиолетовая и видимая область спектра.

Таблица 4 (продолжение)

Метод отбора и/или анализа проб (название)	Прибор для отбора проб	Аналитический метод	Применение метода (ссылки)
Неорганические соединения в газовом состоянии: озон (O₃)			
метод окисления нитрита Согласно EN 14412 и 13528-3	Протокол измерения O ₃ Диффузионный пробоотборник	Ионохроматография	Grivas et al., 2017 (44) Dimakopoulou et al., 2017 (45)
EN 14625 и ISO 13964	УФ-фотометрический метод Автоматический пробоотборник	УФ-фотометрия	Blondeau et al., 2005 (46) Poupard et al., 2005 (47)
Неорганические соединения в газовом состоянии: оксид углерода (CO)			
Прямое считывание	Автоматические портативные мониторы качества воздуха в помещениях (электрохимическая ячейка-непрерывный регистратор	Электрохимический сенсор	Pegas et al., 2012 (48) Chithra & Shiva Nagendra, 2012 (49) Yang et al., 2009 (50) Chaloulakoua & Mavroidisb, 2002 (51) SINPHONE project (43)
EN 14626	Недисперсионный инфракрасный анализатор	Недисперсионная инфракрасная спектроскопия	Yang et al., 2009 (50)

Библиография

1. Geiss O, Giannopoulos G, Tirendi S, Barrero-Moreno J, Larsen BR. The AIRMEX study – VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data. *Atmos Environ*. 2011;45:3676–84. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.04.037.
2. Madureira J, Paciencia I, Pereira C, Teixeira JP, Fernandes E de O. Indoor air quality in Portuguese schools: levels and sources of pollutants. *Indoor Air*. 2016;26:526–37. doi:10.1111/ina.12237.
3. Canha N, Mandin C, Ramalho O, Wyart G, Ribéron J, Dassonville C et al. Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air*. 2016;26(3):350–65. doi:10.1111/ina.12222.
4. Villanueva F, Tapia A, Lara S, Amo-Salas M. Indoor and outdoor air concentrations of volatile organic compounds and NO₂ in schools of urban, industrial and rural areas in Central-Southern Spain. *Sci Total Environ*. 2018;622–623:222–35. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.274.
5. Chiappini L, Dagnelie R, Sassine M, Fuvel F, Fable S, Tran-Thi TH et al. Multi-tool formaldehyde measurement in simulated and real atmospheres for indoor air survey and concentration change monitoring. *Air Qual Atmos Health*. 2011;4:211–20. doi: 10.1007/s11869-010-0102-7.
6. Cipolla M, Izzotti A, Ansaldi F, Durando P, Piccardo MT. Volatile organic compounds in anatomical pathology wards: comparative and qualitative assessment of indoor airborne pollution. *Int J Environ Res Public Health*. 2017;14:609. doi:10.3390/ijerph14060609.
7. Zhong L, Su FC, Batterman S. Volatile organic compounds (VOCs) in conventional and high performance school buildings in the U.S. *Int J Environ Res Public Health*. 2017;14:100. doi:10.3390/ijerph14010100.
8. Faber J, Brodzik K, Golda-Kopek A, Lomankiewicz D, Nowak J, Swiatek A. Passive sampling application to control air quality in interior of new vehicles. *Chemical Papers*. 2015;69(6):799–809.
9. De Gennaro G, de Gennaro L, Mazzone A, Porcelli F, Tutino M. Indoor air quality in hair salons: screening of volatile organic compounds and indicators based on health risk assessment. *Atmos Environ*. 2014;83:119–26. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.10.056.
10. Zhu J, Wong SL, Cakmak S. Nationally representative levels of selected volatile organic compounds in Canadian residential indoor air: population-based survey. *Environ Sci Technol*. 2013;47:13276–83. doi:10.1021/es403055e.
11. De Gennaro G, Farella G, Marzocca A, Mazzone A, Tutino M. Indoor and outdoor monitoring of volatile organic compounds in school buildings: indicators based on health risk assessment to single out critical issues. *Int J Environ Res Public Health*. 2013;10:6273–91. doi:10.3390/ijerph10126273.
12. Kalimeri KK, Saraga DE, Lazaridis VD, Legkas NA, Missia DA, Tolis EI et al. Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: two-season measurements in primary schools in Kozani, Greece. *Atmos Poll Res*. 2016;7:1128–42. doi:10.1016/j.apr.2016.07.002.

13. Mishra N, Bartsch J, Ayoko GA, Salthammer T, Morawska L. Volatile organic compounds: characteristics, distribution and sources in urban schools. *Atmos Environ*. 2015;106:485–91. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.10.052.
14. Sofuoglu SC, Aslan G, Inal F, Sofuoglu A. An assessment of indoor air concentrations and health risks of volatile organic compounds in three primary schools. *Int J Hyg Envir Heal*. 2011;214:36–46. doi:10.1016/j.ijheh.2010.08.008.
15. Hoang T, Castorina R, Gaspar F, Maddalena R, Jenkins PL, Zhang Q et al. VOC exposures in California early childhood education environments. *Indoor Air*. 2017;27:609–21. doi:10.1111/ina.12340.
16. Pegas PN, Alves CA, Evtugina MG, Nunes T, Cerqueira M, Franchi M et al. Seasonal evaluation of outdoor/indoor air quality in primary schools in Lisbon. *J Environ Monit*. 2011;13:657–67. doi:10.1039/c0em00472c.
17. Norbäck D, Hashim JH, Hashim Z, Ali F. Volatile organic compounds (VOC), formaldehyde and nitrogen dioxide (NO₂) in schools in Johor Bahru, Malaysia: associations with rhinitis, ocular, throat and dermal symptoms, headache and fatigue. *Sci Total Environ*. 2017;592:153–60. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.215.
18. Demirel G, Özden O, Döğeroğlu T, Gaga EO. Personal exposure of primary school children to BTEX, NO₂ and ozone in Eskişehir, Turkey: relationship with indoor/outdoor concentrations and risk assessment. *Sci Total Environ*. 2014;473–74:537–48. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.12.034.
19. Wang YC, Lin C, Lin YK, Wang YF, Wenga WH, Kuo YM. Characteristics and determinants of ambient volatile organic compounds in primary schools. *Environ Sci Process Impacts*. 2016;18:1458–68. doi:10.1039/c6em00491a.
20. Oliveira M, Slezakova K, Delerue-Matos C, Pereira MC, Morais S. Polycyclic aromatic hydrocarbons: levels and phase distributions in preschool microenvironment. *Indoor Air*. 2015;25:557–68. doi:10.1111/ina.12164.
21. Raffy G, Mercier F, Blanchard O, Derbez M, Dassonville C, Bonvallot N et al. Semi-volatile organic compounds in the air and dust of 30 French schools: a pilot study. *Indoor Air*. 2017;27:114–27. doi:10.1111/ina.12288.
22. Kang Y, Den W, Bai H, Ko FH. Direct quantitative analysis of phthalate esters as micro-contaminants in cleanroom air and wafer surfaces by auto-thermal desorption–gas chromatography–mass spectrometry. *J Chromatogr A*. 2005;1070:137–45. doi:10.1016/j.chroma.2005.02.055.
23. Sakhi AK, Cequier E, Becher R, Bølling AK, Borgen AR, Schlabach M et al. Concentrations of selected chemicals in indoor air from Norwegian homes and schools. *Sci Total Environ*. 2019;674:1–8. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.086.
24. Fontal M, van Drooge BL, Grimalt JO. A rapid method for the analysis of methyl dihydrojasmonate and galaxolide in indoor and outdoor air particulate matter. *J Chromatogr A*. 2016;1447:135–40. doi:10.1016/j.chroma.2016.04.028.
25. Melymuk L, Robson M, Helm PA, Diamond ML. Evaluation of passive air sampler calibrations: selection of sampling rates and implications for the measurement of persistent organic pollutants in air. *Atmos Environ*. 2011;45:1867–75. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.01.011.

26. Saini A, Okeme JO, Goosey E, Diamond ML. Calibration of two passive air samplers for monitoring phthalates and brominated flame-retardants in indoor air. *Chemosphere*. 2015;137:166–73. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.06.099.
27. Wilford BH, Harner T, Zhu J, Shoeib M, Jones KC. Passive sampling survey of polybrominated diphenyl ether flame retardants in indoor and outdoor air in Ottawa, Canada: implications for sources and exposure. *Environ Sci Technol*. 2004;38(20):5312–18. doi:10.1021/es049260x.
28. Melymuk L, Bohlin-Nizzetto P, Vojta S, Kratka M, Kukucka P, Audy O et al. Distribution of legacy and emerging semivolatile organic compounds in five indoor matrices in a residential environment. *Chemosphere*. 2016;153:179–86. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.03.012.
29. Huang H, Gao L, Xia D, Qiao L, Wang R, Su G et al. Characterization of short- and medium-chain chlorinated paraffins in outdoor/indoor PM₁₀/PM_{2.5}/PM_{1.0} in Beijing, China. *Environ Pollut*. 2017;225:674–80. doi:10.1016/j.envpol.2017.03.054.
30. Fridén UE, McLachlan MS, Berger U. Chlorinated paraffins in indoor air and dust: concentrations, congener patterns, and human exposure. *Environ Inter*. 2011;37:1169–74. doi:10.1016/j.envint.2011.04.002.
31. Vicente ED, Ribeiro JP, Custódio D, Alves CA. Assessment of the indoor air quality in copy centres at Aveiro, Portugal. *Air Qual Atmos Health*. 2017;10:117–27. doi:10.1007/s11869-016-0401-8.
32. Błaszczak E, Rogula-Kozłowska W, Klejnowski K, Furala I, Mielzynska-Svach D. Polycyclic aromatic hydrocarbons bound to outdoor and indoor airborne particles (PM_{2.5}) and their mutagenicity and carcinogenicity in Silesian kindergartens, Poland. *Air Qual Atmos Health*. 2017;10:389. doi:10.1007/s11869-016-0457-5.
33. Fromme H, Diemer J, Dietrich S, Cyrus J, Heinrich J, Lang W et al. Chemical and morphological properties of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air. *Atmos Environ*. 2008;42:6597–6605. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.04.047.
34. Alves C, Nunes T, Silva J, Duarte M. Comfort parameters and particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air. *Aerosol Air Qual Res*. 2013;13:1521–35. doi:10.4209/aaqr.2012.11.0321.
35. Branco PTBS, Alvim-Ferraz MCM, Martins FG, Sousa SIV. Indoor air quality in urban nurseries at Porto city: particulate matter assessment. *Atmos Environ*. 2014;84:133–43. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.11.035.
36. Mathew J, Goyal R, Taneja KK, Arora N. Air pollution and respiratory health of school children in industrial, commercial and residential areas of Delhi. *Air Qual Atmos Health*. 2015;5:421–7. doi:10.1007/s11869-014-0299-y.
37. Hafkenscheid T, Fromage-Mariette A, Goelen E, Hangartner M, Pfeffer U, Plaisance H et al. Review of the application of diffusive samplers in the European Union for the monitoring of nitrogen dioxide in ambient air. Brussels: Publications Office of the European Union; 2009 (<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/review-application-diffusive-samplers-measurement-nitrogen-dioxide-ambient-air-european>, accessed 21 November 2019).

38. Tolis EI, Panaras G, Bartzis JG. A comprehensive air quality investigation at an aquatic centre: indoor/outdoor comparisons. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2018;25:16710–19. doi:10.1007/s11356-018-1882-9.
39. Sanz MJ, Calatayud V, Sánchez-Peña G. Measures of ozone concentrations using passive sampling in forests of south western Europe. *Environ Pollut.* 2007;145:620–8. doi:10.1016/j.envpol.2006.02.031.
40. Martin P, Cabañas B, Villanueva F, Gallego MP, Colmenar I, Salgado S. Ozone and nitrogen dioxide levels monitored in an urban area (Ciudad Real) in central-southern Spain. *Water Air Soil Pollut.* 2010;208:305–16. doi:10.1007/s11270-009-0168-8.
41. Bozkurt Z, Doğan G, Arslanbaş D, Pekey B, Pekey H, Dumanoğlu Y et al. Determination of the personal, indoor and outdoor exposure levels of inorganic gaseous pollutants in different microenvironments in an industrial city. *Environ Monit Assess.* 2015;187:590. doi:10.1007/s10661-015-4816-8.
42. Finco A, Marzuoli R, Chiesa M, Gerosa G. Ozone risk assessment for an alpine larch forest in two vegetative seasons with different approaches: comparison of POD1 and AOT40. *Environ Sci Pollut Res.* 2017;24:26238–48. doi:10.1007/s11356-017-9301-1.
43. SINPHONIE, Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe. SINPHONIE – Executive summary of the final report. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2014 (<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC91163/lbna26730enn.pdf>, accessed 21 November 2019).
44. Grivas G, Dimakopoulou K, Samoli E, Papakosta D, Karakatsani A, Katsouyanni K et al. Ozone exposure assessment for children in Greece – results from the RESPOZE study. *Sci Total Environ.* 2017;581–582:518–29. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.159.
45. Dimakopoulou K, Grivas G, Samoli E, Rodopoulou S, Spyrtatos D, Papakosta D et al. Determinants of personal exposure to ozone in school children. Results from a panel study in Greece. *Environ Res.* 2017;154:66–72. doi:10.1016/j.envres.2016.12.020.
46. Blondeau P, Iordache V, Poupard O, Genin D, Allard F. Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. *Indoor Air.* 2005;15:2–12. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00263.x.
47. Poupard O, Blondeau P, Iordache V, Allard F. Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools. *Atmos Environ.* 2005;39:2071–80. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.12.016.
48. Pegas PN, Alves CA, Nunes T, Bate-Epey EF, Evtyugina M, Pio CA. Could houseplants improve indoor air quality in schools? *J Toxicol Environ Health A.* 2012;75(22–23):1371–80. doi:10.1080/15287394.2012.721169.
49. Chithra VS, Shiva Nagendra SM. Indoor air quality investigations in a naturally ventilated school building located close to an urban roadway in Chennai, India. *Build Environ.* 2012;54:159–67. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.016.
50. Yang W, Sohn J, Kim J, Son B, Park J. Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *J Environ Manag.* 2009;90:348–54. doi:10.1016/j.jenvman.2007.10.003.

51. Chaloulakou A, Mavroidis I. Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school. Evaluation of an indoor air quality model. *Atmos Environ.* 2002;36:1769–81. doi:10.1016/S1352-2310(02)00151-6.
52. User manual 2019 for Radiello® sampler. Version 1/2003. Vigonza: Fondazione Salvatore Maugeri; 2003 (<https://www.restek.com/pdfs/radiello-manual.pdf>, accessed 21 November 2019).
53. Ogawa & Co. Protocol for ozone measurement using the ozone passive sampler badge. Cambridge: Harvard School of Public Health; 2001 (<http://ogawausa.com/wp-content/uploads/2014/04/proozone.pdf>, accessed 21 November 2019).

Европейское региональное бюро ВОЗ

Созданная в 1948 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) – это специализированное учреждение Организации Объединенных Наций, основной функцией которой является руководство и координация международной деятельности в области общественного здравоохранения. Европейское региональное бюро ВОЗ – это одно из шести расположенных в различных частях мира региональных бюро, каждое из которых проводит собственную программу, направленную на решение конкретных проблем здравоохранения обслуживаемых им стран.

Государства-члены

Австрия	Италия	Сербия
Азербайджан	Казахстан	Словакия
Албания	Кипр	Словения
Андорра	Кыргызстан	Соединенное Королевство
Армения	Латвия	Таджикистан
Беларусь	Литва	Туркменистан
Бельгия	Люксембург	Турция
Болгария	Мальта	Узбекистан
Босния и Герцеговина	Монако	Украина
Венгрия	Нидерланды	Финляндия
Дания	Норвегия	Франция
Германия	Польша	Хорватия
Греция	Португалия	Черногория
Грузия	Республика Молдова	Чехия
Израиль	Российская Федерация	Швейцария
Ирландия	Румыния	Швеция
Исландия	Сан-Марино	Эстония
Испания	Северная Македония	



Всемирная организация здравоохранения
Европейское региональное бюро
UN City, Marmorvej 51, DK-2100 Copenhagen, Denmark Тел.: +45
45 33 70 00; факс: +45 45 33 70 01
Адрес эл. почты: eurocontact@who.int
Веб-сайт: www.euro.who.int