

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 504.3.054

С. В. КАКАРЕКА, Ю. Г. КОКОШ

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
НА УРОВНИ СОДЕРЖАНИЯ ФОРМАЛЬДЕГИДА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ

(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
sk001@yandex.ru; y-kokosh@mail.ru

Приведены новые результаты изучения содержания формальдегида в воздухе у источников выделения и в атмосферном воздухе в зоне воздействия предприятий Беларуси, производящих древесные слоистые материалы и формальдегидные смолы. Установлено, что уровни содержания формальдегида в атмосферном воздухе в зоне воздействия предприятий по производству древесностружечных плит (ДСП) и карбомидоформальдегидных смол выше по сравнению с заводами по производству фанеры, древесноволокнистых плит (ДВП и МДФ). Установлена устойчивая зависимость содержания формальдегида в атмосферном воздухе в зоне от объема выбросов. Оценена связь содержания формальдегида в атмосферном воздухе с расстоянием от источников выбросов и условиями рассеяния.

*Ключевые слова:* формальдегид, измерение, выбросы, атмосферный воздух, рассеяние, деревообрабатывающая промышленность.

S. V. KAKAREKA, Y. G. KOKOSH

IMPACT ASSESSMENT OF WOOD-PROCESSING FACILITIES  
ON FORMALDEHYDE CONCENTRATIONS IN ATMOSPHERIC AIRInstitute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
sk001@yandex.ru; y-kokosh@mail.ru

In the paper new results of investigation of formaldehyde in the air at the sources of release and in the ambient air at the impact zones of wood-processing facilities of Belarus producing laminated wood materials and formaldehyde resins are given. It is shown that highest average concentrations of formaldehyde at sources of release are typical for particleboard and resins production at out of date equipment. It is revealed that levels of formaldehyde content in atmospheric air near particleboard and resins production facilities are higher compared to plywood, fiberboard and MDF production. Stable relation of formaldehyde content in atmospheric air with release rate was established. Relation of content of formaldehyde in atmospheric air with the distance from the source of release and dispersion conditions was estimated.

*Keywords:* formaldehyde, measurement, emission, air, dispersion, wood-processing industry.

**Введение.** Формальдегид относится к приоритетным веществам, загрязняющим атмосферный воздух городов, и оказывает разнообразное токсическое воздействие на живые организмы. Помимо общетоксического действия, у него выявлено наличие канцерогенных свойств [1–4].

Содержание формальдегида в атмосфере формируется в результате динамического равновесия между источниками и стоками. Формальдегид является сильно реакционноспособным веществом с периодом полувыведения из атмосферы от 1,5 часов до нескольких суток [1; 5]. Период полураспада формальдегида зависит от уровня ультрафиолета, концентрации других загрязнителей.

К важным промышленным источникам формальдегида относится деревообрабатывающая промышленность. В настоящее время от деревообрабатывающего производства в атмосферный воздух поступает около 40 % валовых выбросов формальдегида от стационарных источников. Формальдегид в данной отрасли выделяется при производстве прессованных и слоистых мате-

© Какарека С. В., Кокосх Ю. Г., 2016.

риалов (фанеры, ДСП, ДВП, МДФ) как следствие применения связующих смол (фенолоформальдегидных, карбамидоформальдегидных и др.). Основными источниками выделения формальдегида при изготовлении смол являются реакторы варки смолы, усреднители смолы, при производстве продукции деревообработки – гидравлические прессы, клеевые вальцы [5].

В связи с увеличением мощностей предприятий после начавшейся в 2007 г. модернизации деревообрабатывающего производства отмечается рост выбросов формальдегида от деревообрабатывающей промышленности с 40 т в 2007 г. до 75 т в 2014 г.

На территории Беларуси регулярные наблюдения за содержанием формальдегида в атмосферном воздухе осуществляются в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды. В настоящее время наблюдения за концентрациями формальдегида проводятся на 52 стационарных станциях в 17 городах Беларуси. Однако станции расположены без привязки к источникам и позволяют оценить только общегородской уровень загрязнения атмосферного воздуха формальдегидом. По данным стационарных наблюдений, практически во всех городах фиксируются концентрации формальдегида, превышающие установленные нормативы ПДК. Средняя концентрация формальдегида в Беларуси по данным мониторинга в 2012 г. составила 7,2 мкг/м<sup>3</sup> [6].

В Европе измерения содержания формальдегида осуществляются в основном на фоновых территориях. В рамках Программы ЕМЕП с 1999 г. концентрация формальдегида (в составе других ЛОС) замеряется на 10 станциях, расположенных в Чехии, Финляндии, Франции, Германии. Средние фоновые концентрации за период с 1999 по 2010 г. составили 1,2 мкг/м<sup>3</sup> [5; 7]. Наибольшее число опубликованных результатов измерений формальдегида относится к городам США (Детройт, Сиэтл, Батон-Руж, Майами, Чикаго, Кливленд, Хьюстон и др.) [2; 8].

В литературе большое внимание уделено исследованиям содержания формальдегида в воздухе рабочей зоны и вреда здоровью работников. По данным [9–12], концентрации формальдегида в воздухе на предприятиях по производству продукции деревообработки могут достигать 3,2 мг/м<sup>3</sup>. Много исследований также посвящено выявлению уровней содержания формальдегида внутри помещений, особенно новых зданий, содержащих материалы, выделяющие формальдегид [12]. Однако вопросы оценки уровней содержания формальдегида в атмосферном воздухе в районе воздействия промышленных предприятий, в том числе деревообрабатывающих, являются мало изученными. Указывается [12], что в промышленной зоне в Китае средние концентрации формальдегида составляли 14,1 мкг/м<sup>3</sup>. Концентрации формальдегида в атмосферном воздухе Южной Кореи в промышленной зоне составили 23,7 мкг/м<sup>3</sup> с диапазоном значений от 2,6 до 51,9 мкг/м<sup>3</sup> [11]. По данным ряда исследований, средние концентрации формальдегида в атмосферном воздухе в зоне воздействия предприятий по производству строительных древесных материалов достигали 42 мкг/м<sup>3</sup> [9].

Это определило следующие задачи для проведения экспериментальных исследований:

оценка уровней содержания формальдегида у источников его выделения и в атмосферном воздухе на различном удалении от источников выбросов предприятиями по производству карбамидоформальдегидных синтетических смол и древесных слоистых материалов (ДСП, ДВП, МДФ, фанера);

оценка связей уровней концентраций формальдегида в атмосферном воздухе с мощностью предприятий и условиями рассеяния.

**Материалы и методы исследования.** Всего в Беларуси производство карбамидоформальдегидных синтетических смол и слоистых древесных материалов осуществляется на 11 предприятиях. В качестве объектов исследования выбраны 8 производств на 5 предприятиях, расположенных в Минской, Могилевской и Брестской областях. Из них на двух предприятиях осуществляется производство фанеры суммарной годовой мощностью 40 тыс. м<sup>3</sup> в год, на двух – ДСП мощностью 260 тыс. усл. м<sup>3</sup>, на двух – производство синтетических смол, на одном – производство МДФ мощностью 60 тыс. м<sup>3</sup>, на одном – ДВП мощностью 25 млн усл. м<sup>2</sup>. Из указанных 8 производств, 5 относились к старым или не модернизированным (обновление оборудования до 2000 г.) и 3 – к новым и прошедшим модернизацию. Суммарные выбросы формальдегида от указанных объектов в 2013 г. составили 33 т (от 0,05 до 8,4 т), что составило более 80 % выбросов формальдегида от деревообрабатывающих предприятий Беларуси.

Исследованные предприятия характеризуются высотой источников выбросов формальдегида от 2,5 до 46,2 м. Преобладают низкие источники (до 17 м). На их долю приходится более 60 % суммарных выбросов формальдегида от предприятий, на источники высотой более 35 м – 32 %. Максимальная интенсивность выбросов формальдегида – 0,59 г/с, в период проведения измерений интенсивность выбросов составляла от 0,02 до 0,53 г/с.

Экспериментальные работы включали:

отбор проб воздуха аспиратором на выходе из источника выделения, на промышленной площадке и за ее пределами;

замеры метеорологических параметров: температуры воздуха, влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветра;

сбор информации о производственном процессе, параметрах источников выбросов, ландшафтно-географических условиях местности.

Отбор проб воздуха осуществлялся на расстоянии до 600 м от источников выбросов преимущественно с подветренной стороны. При выборе точек опробования учитывались направление ветра и условия рассеивания.

Для выбора точек измерений содержания формальдегида в атмосферном воздухе зоны воздействия деревообрабатывающих предприятий использованы функции горизонтальной и вертикальной дисперсии примесей Паскуилла–Гиффорда [13]. Горизонтальная и вертикальная дисперсия примеси Паскуилла–Гиффорда определялась как функция расстояния от источника для каждого из классов стабильности Паскуилла. Измерения выполнялись под факелом рассеяния с учетом нахождения расчетной зоны максимальных расчетных концентраций насколько возможно, учитывая доступность той или иной точки.

Определение массовой концентрации формальдегида в отобранных пробах проводилось фотокориметрическим методом с использованием стандартной методики с фенилгидразином [14].

Экспериментальные исследования содержания формальдегида в зоне воздействия источников выбросов формальдегида выполнялись в период с 2011 по 2014 г. в теплый период года (апрель–октябрь). Всего отобрано и проанализировано 688 проб, из них 225 – непосредственно у источников выделения формальдегида, 183 пробы – на промышленных площадках предприятий, 280 – за пределами промплощадок предприятий.

Исследования содержания формальдегида непосредственно у источников выделения внутри зданий цехов проводилось на 6 из 8 рассмотренных объектов: 1 – по производству фанеры, 2 – по производству ДСП, 2 – по производству карбомидоформальдегидных смол, 1 – по производству МДФ. На фанерном заводе измерения проводились на этапе нанесения карбомидоформальдегидной смолы на листы шпона вальцами и на этапе прессования фанеры. При производстве МДФ и ДСП исследования проводились в трех местах производственной линии: на складе компонентов связующего, на этапе пропитывания древесного волокна и стружки связующим и этапе формирования ковра и прессования. При производстве карбомидоформальдегидных смол экспериментальные исследования проводились возле реакторов варки смолы и отстойников.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты исследований содержания формальдегида у источников выделения на исследованных объектах приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Содержание формальдегида в воздухе у источников выделения на деревообрабатывающих предприятиях, мкг/м<sup>3</sup>

Производство	Количество проб	Диапазон	Средняя
Производство фанеры, Минская обл.	43	8,2–107,8	31,7
Производство МДФ, Минская обл.	30	5,8–240,8	77,1
Производство карбомидоформальдегидных смол, Минская обл.	64	8,2–1078,8	197,1
Производство карбомидоформальдегидных смол, Брестская обл.	32	51,8–715,4	285,4
Производство ДСП, Брестская обл.	36	23,9–828,3	295,3
Производство широкоформатной ДСП, Брестская обл.	20	63,7–269,5	140,7
Всего	225	5,8–1078,8	182,9

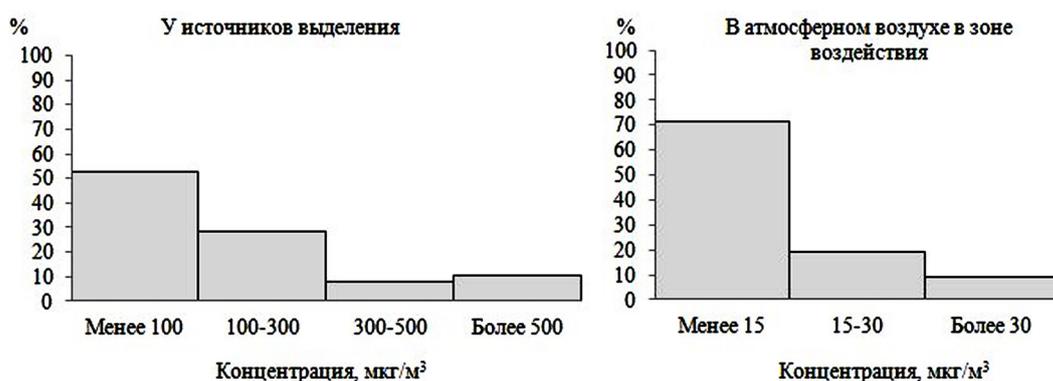


Рис. 1. Распределение проб по содержанию формальдегида в воздухе у источников выделения и в атмосферном воздухе в зоне воздействия деревообрабатывающих предприятий

Наибольшие средние концентрации получены для предприятий по производству ДСП и варке синтетических смол на устаревшем оборудовании.

Среднее содержание формальдегида у источников выделения составило 183 мкг/м³ с диапазоном замеренных значений от 5,8 до 1078,8 мкг/м³. В более чем половине отобранных проб (52,9 %) содержание формальдегида находилось в диапазоне 0–100 мкг/м³, в 28,4 % – 100–300 мкг/м³, в 8,0 % – 300–500 мкг/м³, в 10,7 % – более 500 мкг/м³ (рис. 1).

В табл. 2 в сводном виде представлены результаты экспериментальных исследований содержания формальдегида в атмосферном воздухе в зоне воздействия источников выбросов. Средние концентрации формальдегида по производствам составили 5,8–40,8 мкг/м³.

Т а б л и ц а 2. Концентрации формальдегида в атмосферном воздухе в зоне воздействия деревообрабатывающих предприятий по результатам экспериментальных исследований

Предприятие	Максимальный выброс формальдегида, г/с	Количество проб	Концентрация, мкг/м³	
			Диапазон	Средняя
Производство фанеры, Минская обл.	0,40	159	2,5–98,5	11,1
Производство МДФ, Минская обл.	0,26	29	2,2–10,2	5,8
Производство ДВП, Минская обл.	0,08	75	0–28,1	11,5
Производство карбомидоформальдегидных смол, Минская обл.	0,05	80	2,3–39,6	10,2
Производство ДСП, Брестская обл.	0,37	63	4,8–183,0	40,8
Производство широкоформатной ДСП, Брестская обл.	0,59	20	8,3–81,6	34,4
Производство фанеры, Могилевская обл.	0,27	37	2,7–36,5	16,3
Всего		463	0–183,0	16,0

Наиболее высокие уровни максимально разовых концентраций формальдегида получены на старых предприятиях. Даже с увеличением мощностей предприятий, концентрации формальдегида на новых заводах в среднем на 40 % ниже, чем на старых.

Выполненные исследования показали, что содержание формальдегида в зоне воздействия источников выбросов наблюдалось от значений ниже пределов обнаружения метода до 183,0 мкг/м³. В среднем содержание формальдегида в атмосферном воздухе составило 16,0 мкг/м³. Содержание формальдегида в 71,4 % отобранных проб воздуха находилось в диапазоне 0–15 мкг/м³, в 19,2 % – 15–30 мкг/м³, в 9,4 % – более 30 мкг/м³ (рис. 1).

Наиболее высокие средние концентрации формальдегида получены у источников при производстве ДСП (289 мкг/м³) и карбомидоформальдегидных смол (227 мкг/м³). Аналогично и в атмосферном воздухе, наиболее высокие средние концентрации формальдегида получены в районе воздействия производств ДСП (32,3 мкг/м³) и синтетических смол (20,1 мкг/м³) (рис. 2).

Проведены сопряженные во времени исследования связи уровня содержания формальдегида внутри производственных помещений у источников его выделения с уровнем содержания формальдегида в атмосферном воздухе в зоне воздействия его источников. Выявлена довольно тес-

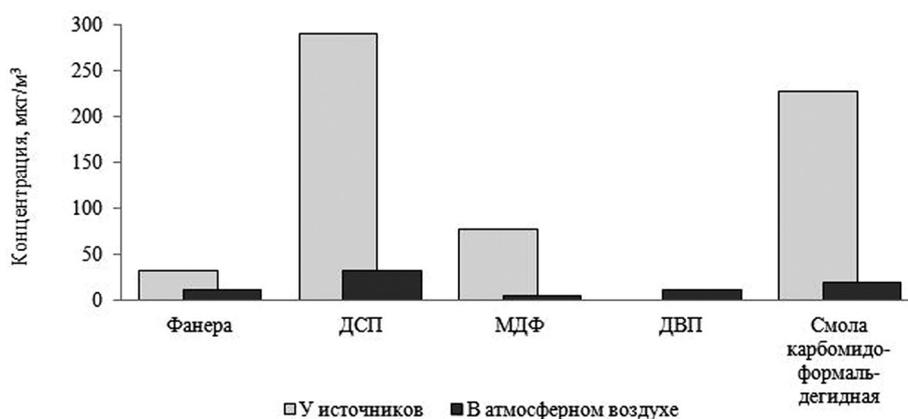


Рис. 2. Сравнение средних концентраций формальдегида у источников и в атмосферном воздухе для различных производств

ная связь (коэффициент корреляции равен  $R = 0,64$ ), что обусловлено преобладанием низких источников выбросов, а также наличием неорганизованных источников выделения формальдегида (открытые окна, ворота цехов и др.) (рис. 3, а).

*Зависимость концентраций формальдегида в атмосферном воздухе от объема выбросов.* Объем выбросов формальдегида от источников в деревообрабатывающей промышленности зависит от типа используемой синтетической смолы и ее расхода (т. е. объема производимой продукции). Выявлена прямая линейная зависимость полученных в результате экспериментов средних концентраций формальдегида в атмосферном воздухе в зоне воздействия источников выбросов от величины выбросов формальдегида (коэффициент корреляции равен  $R = 0,75$ ) (рис. 3, б).

*Зависимость концентраций формальдегида в атмосферном воздухе от расстояния и направления ветра.* Для оценки влияния направления ветра на концентрации формальдегида при исследованиях учитывалось направление ветра относительно источников выбросов формальдегида. Полученные концентрации формальдегида с подветренной стороны источников выбросов в среднем составили  $21,1 \text{ мкг/м}^3$ , что в 1,7–2,6 раз выше, чем с наветренной (рис. 4, табл. 3).

Наиболее высокие концентрации формальдегида получены на небольшом (200 м) расстоянии от основных его источников (рис. 4).

В основном измерения выполнялись при нестабильном состоянии приземного слоя атмосферы – более 70 % проб относятся к классам стабильности А и В Паскуилла (невысокая скорость ветра и достаточно высокая интенсивность солнечного излучения). Это означает, что в период отбора проб условия рассеивания были хорошими, при которых максимальные концентрации достигаются на небольшом удалении от источников.

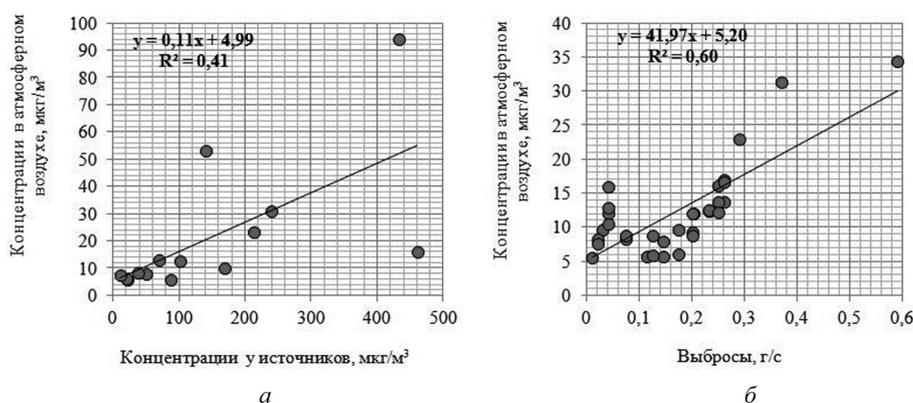


Рис. 3. Зависимость среднего содержания формальдегида в атмосферном воздухе от его уровня возле источников выделения (а) и от величины выбросов формальдегида (б)

Т а б л и ц а 3. Средние концентрации формальдегида в зоне воздействия источников выбросов формальдегида

Производство	Средние концентрации, мкг/м <sup>3</sup>		Соотношение
	подветренная сторона	наветренная сторона	
Фанерный завод, Минская обл.	14,5	7,1	2,0
Производство МДФ, Минская обл.	7,9	4,8	1,7
Производство ДВП, Минская обл.	14,1	6,2	2,3
Производство карбомидоформальдегидных смол, Минская обл.	15,1	7,4	2,0
Производство ДСП, Брестская обл.	42,3	16,4	2,6
Производство широкоформатной ДСП, Брестская обл.	45,8	20,5	2,2
Производство фанеры, Могилевская обл.	20,5	11,4	1,8
Среднее	21,1	8,2	2,6

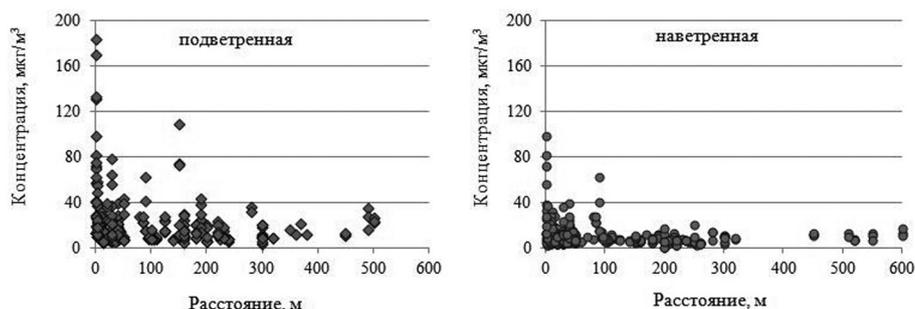


Рис. 4. Зависимость концентраций формальдегида в атмосферном воздухе в зоне воздействия источников выбросов от расстояния до источника выбросов

Согласно полученным результатам, в целом по всем рассмотренным объектам наиболее высокие концентрации формальдегида в атмосферном воздухе в зоне воздействия источников выбросов деревообрабатывающих производств получены при нестабильных условиях (средние концентрации от 20,9 мкг/м<sup>3</sup> – для класса А до 4,1 мкг/м<sup>3</sup> – для класса D).

Полученные результаты были сопоставлены с величинами расчетных концентраций формальдегида, аппроксимированных простой гауссовой моделью рассеяния примеси [13] на основании данных о высоте источника, мощности выброса и условий рассеяния. Максимальная расчетная приземная концентрация формальдегида составила для первых четырех классов стабильности (А–D) соответственно 122,2, 183,3, 217,9, 364,4 мкг/м<sup>3</sup> (без учета наложения факелов рассеяния источников). С учетом мощности источника и возможного наложения факелов рассеяния концентрации до 380 мкг/м<sup>3</sup> при указанных условиях рассеяния могут наблюдаться для ряда производств на расстояниях до 140 м, до 244 мкг/м<sup>3</sup> – на расстояниях до 300 м.

Замеренные концентрации имеют достаточно высокую сходимость с ориентировочными расчетными данными для предприятий по производству ДСП, МДФ и смол; в то же время замеренные концентрации формальдегида в атмосферном воздухе в районе воздействия предприятий по производству фанеры существенно ниже расчетных, что может быть обусловлено большой погрешностью расчетов рассеяния для низких (2,5–12 м) источников выбросов на предприятиях по производству фанеры.

**Закключение.** В ходе проведенных исследований установлено, что наибольшие средние концентрации формальдегида у источников выделения получены при производстве ДСП и варке карбомидоформальдегидных смол на устаревшем оборудовании. Проведенные исследования показали, что уровни содержания формальдегида в атмосферном воздухе в зоне влияния предприятий по производству ДСП и карбомидоформальдегидных смол выше по сравнению с заводами по производству фанеры, МДФ и ДВП. Выявлены устойчивые связи содержания формальдегида в атмосферном воздухе с мощностью выбросов.

Выявлено значительное влияние на фиксируемые концентрации формальдегида в зоне воздействия условий рассеяния.

Замеренные концентрации в целом укладываются в диапазон концентраций, полученных приближенно-расчетными по простой гауссовой модели, с учетом сложности «попадания» точки измерения на ось факела рассеяния.

### Список использованной литературы

1. *Воробьева, И. А.* Исследование причин формирования повышенных концентраций формальдегида в атмосфере городов / И. А. Воробьева // Тр. ГГО им. А. И. Воейкова. – Спб., 2008. – Вып. 557. – С. 206–216.
2. ATSDR. 1999. Toxicological Profile for Formaldehyde (Final Report). NTIS Accession №. PB99-166654. – Atlanta, GA: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
3. Environmental Health Criteria 89. Formaldehyde. – Geneva. WHO, 1989. – 182 p.
4. Final Report on the Identification of Formaldehyde as a Toxic Air Contaminant / Prepared by the Staffs of the Air Resources Board and the Office of Environmental Health Hazard Assessment July 1992. – 17 p.
5. *Какарека, С. В.* Анализ и оценка источников выбросов формальдегида в атмосферный воздух на территории Беларуси / С. В. Какарека, Ю. Г. Ашурко // Природопользование. – 2012. – Вып. 21. – С. 75–82.
6. Состояние природной среды Беларуси. Экологический бюллетень. 2013 год / под общ. ред. акад. В. Ф. Логинова. – Минск, 2014. – 362 с.
7. VOC measurements 2012–2013 EMEP/CCC-Report 4/2015 / S. Solberg, C. Hörger, A. Claude, C. Plass-Dülmer, S. Reimann, S. Sauvage.
8. *Williamson, J.* Seattle Air Toxics Studies. Air Toxics Monitoring and Data Analysis / J. Williamson, H. Westberg // Workshop October 29–30. – Chicago, IL, 2001. – 39 p.
9. *Жук, П. М.* Исследование загрязнения окружающей среды формальдегидом на предприятиях строительных материалов / П. М. Жук // Вестн. МГСУ. – 2013. – № 4. – С. 102–112.
10. Investigation of carbonyl compounds in air from various industrial emissions sources / K.-H. Kim [et al.] // Chemosphere. – 2008. – Vol. 70. – P. 807–820.
11. The Pollution Status of Atmospheric Carbonyls in a Highly Industrialized Area / R. Pal [et al.] // J. Hazard. Mater. – 2008. – 153. – P. 1122–1135.
12. Formaldehyde in China: Production, consumption, exposure levels, and health effects / X. Tang [et al.] // Environment International. – 2009. – N 35. – P. 1210–1224.
13. *Turner, D.* Workbook of atmospheric dispersion estimates / D. Turner. – CRC Pres LLC, 1994.
14. Сборник методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении измерений в области охраны окружающей среды: в 3 ч. Ч. 3 / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, РУП «БелНИЦ «Экология»; ред. В. В. Анцукевич [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – Минск: Бел НИЦ «Экология», 2011. – С. 26–31.

Поступило в редакцию 28.03.2016