

## МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА СВЕРХНОРМАТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И НАДЗОРА В РОССИИ

Проблема загрязнения атмосферного воздуха остро стоит во многих городах, несмотря на развивающееся природоохранное законодательство и внедрение на промышленных предприятиях более экологичного и эффективного оборудования. Основная проблема сводится именно к локализации источника загрязнения, выбросы которого привели к нарушению качества атмосферного воздуха.

Наше исследование направлено на локализацию области расположения источника сверхнормативного загрязнения и его выявление в максимально короткие сроки. В работе представлен алгоритм предварительной оценки расположения источников загрязнения, выбросы которых могли привести к превышению допустимых концентраций в воздухе. Полученные результаты могут быть использованы в работе органов государственной власти в области охраны окружающей среды.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы, сверхнормативный выброс, мониторинг загрязнения воздуха, поиск источника загрязнения, анализ загрязнения атмосферы, источник выброса загрязняющих веществ.

**Введение.** С целью ограничения негативного воздействия промышленности на окружающую среду, в том числе и на атмосферный воздух, в начале XX века была разработана и внедрена система нормирования качества окружающей среды. Однако, несмотря на установленные достаточно жесткие нормы и регулярный контроль их соблюдения промышленными предприятиями, проблема сверхнормативного загрязнения атмосферного воздуха до сих пор остается актуальной для многих промышленных городов как в России, так и за рубежом. Омск, как один из крупнейших промышленных городов Российской Федерации, не избежал вышеуказанной проблемы, несмотря на то, что в городе ведется планомерная работа по сокращению промышленных выбросов в атмосферу и совершенство-

вание систем мониторинга качества окружающей среды.

Согласно данным «Доклада об экологической ситуации в Омской области за 2017 год», количество выбросов от стационарных источников за период с 2011 до 2017 года снизилось с 235,9 тыс. тонн до 192,8 тыс тонн, что приводит к снижению общего уровня загрязнения атмосферного воздуха [1].

Несмотря на снижение общего уровня загрязнения атмосферного воздуха — в 2017 году уровень загрязнения соответствовал «низкому», — доля проб, отобранных на территории города, и в которых было выявлено превышение ПДК<sub>мр</sub>, увеличилась на 0,13 % по сравнению с 2016 годом [2]. За десять месяцев 2017 года в Управление Росприроднадзора по Омской

области поступило более 700 жалоб на качество атмосферного воздуха. При этом только автоматизированными постами наблюдений был зарегистрирован 51 случай превышения максимально разовых концентраций в атмосфере города [1].

Дополнительно в марте 2017 года в результате обработки массовых жалоб населения на присутствие химического запаха в приземном слое воздуха города были зафиксированы значительные превышения допустимой концентрации меркаптанов. Этот случай показал неготовность постов мониторинга к ситуациям несанкционированного или сверхнормативного выброса.

При получении информации о нарушении качества атмосферного воздуха природоохранными органами исполнительной власти организуются проверки промышленных предприятий, однако выявить конкретный источник зачастую становится невозможно. Поиск может затрудняться тем, что несколько предприятий могут располагаться в непосредственной близости друг от друга и иметь одноименные вещества в выбросах. Проведение проверки одного только предприятия может занять от нескольких часов до 20 дней [3], при этом следует учитывать необходимость привлечения лаборатории для проведения контрольного отбора проб воздуха. Организация и проведение проверок всех подразумеваемых в нарушении предприятий может занимать достаточно длительный период времени, что и приводит к неудовлетворительным результатам.

Для локализации источников загрязнения, допустивших сверхнормативный выброс, на сегодняшний день *разработан ряд методов и алгоритмов*. Так, в статьях [4, 5] описано применение искусственных нейронных сетей для решения задачи идентификации одного или нескольких возможных источников выбросов. В статье [6] представлен подход к определению неизвестного стационарного источника выбросов, основанный на итерационном вычислении массы выбросов и расхода газовой смеси. В качестве критерия выступает среднее квадратическое расхождение между рассчитанными на моделях значениями приземных концентраций и значениями, полученными в результате измерений. Аналогичный метод оценки локализации источников и интенсивности выбросов предлагается в работе [7] с помощью моделирования на основе AERMOD.

Авторами [8, 9] предложена методология идентификации источников сверхнормативного загрязнения атмосферы на основе использования математического аппарата основных и сопряженных уравнений переноса и диффузии примесей, разработанного Г. И. Марчуком.

Общим недостатком предложенных методов в работах, представленных выше, является то, что все они основаны на наличии полной достоверной информации о параметрах и расположении источника загрязнения, зачастую дополненную или полностью основанную на измерениях уровней концентраций загрязняющих веществ. Однако зачастую сверхнормативный выброс может быть связан не с аварийной работой какого-либо известного источника, а с несанкционированным выбросом неучтенного ранее источника воздействия.

В работах [10–13] предлагается использование беспилотных летательных аппаратов с установленными датчиками измерения концентраций загрязняющих веществ, данные с которых поступают оператору для вычисления оптимального маршрута для идентификации источника сверхнормативного выброса. При этом остается не раскрытым вопрос работы подобных аппаратов в условиях плотной промышленной застройки. Более того, не учитывается то обстоятельство, что концентрация, измеренная на высоте 15–20 метров, не всегда описывает состояние атмосферного воздуха в приземном (2-метровом) слое воздуха.

Таким образом, актуальной остается проблема предварительной локализации области расположения возможного виновника сверхнормативного загрязнения в условиях, когда не известны ни параметры источника, ни его расположение.

Наша работа направлена на повышение эффективности работы государственных органов в области охраны атмосферного воздуха в условиях ограниченной информации об источниках выбросов. Для этого необходимо проведение предварительной оценки, направленной на сужение зоны поиска, что позволяет сократить количество промышленных предприятий для проведения проверок.

**Постановка задачи.** Цель нашей работы заключается в создании алгоритма предварительной оценки расположения возможных источников загрязнения.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- изучить влияние метеорологических факторов на формирование высоких уровней загрязнения атмосферы в населенном пункте;
- разработать алгоритм предварительной идентификации зоны возможного расположения источников сверхнормативного выброса.

**Теория.** Информация о нарушении качества атмосферного воздуха может поступать из разных источников: это могут быть данные с постов мониторинга, информирование от населения и др.

Предварительная оценка расположения источников загрязнения основана на анализе метеорологических данных и предполагает исключение источников выбросов, не причастных к созданию уровней концентраций в момент фиксации нарушения качества приземного слоя воздуха.

Построение секторов расположения источников загрязнения основано на направлениях ветра, зафиксированных в момент поступления информации о нарушении ( $v_1$ ) и при проведении отбор пробы воздуха в месте, откуда поступила информация ( $v_2$ ).

По зафиксированным направлениям ветра  $v_1$  и  $v_2$  выстраивается сектор АСВ (рис. 1) радиусом  $R$ , внутри которого вероятность нахождения источника сверхнормативного загрязнения является наиболее высокой.

Для определения радиуса поиска были проанализированы расстояния от источника загрязнения до точки максимальной концентрации загрязняющего вещества, создаваемой его выбросом. Расчеты рассеивания проводились для

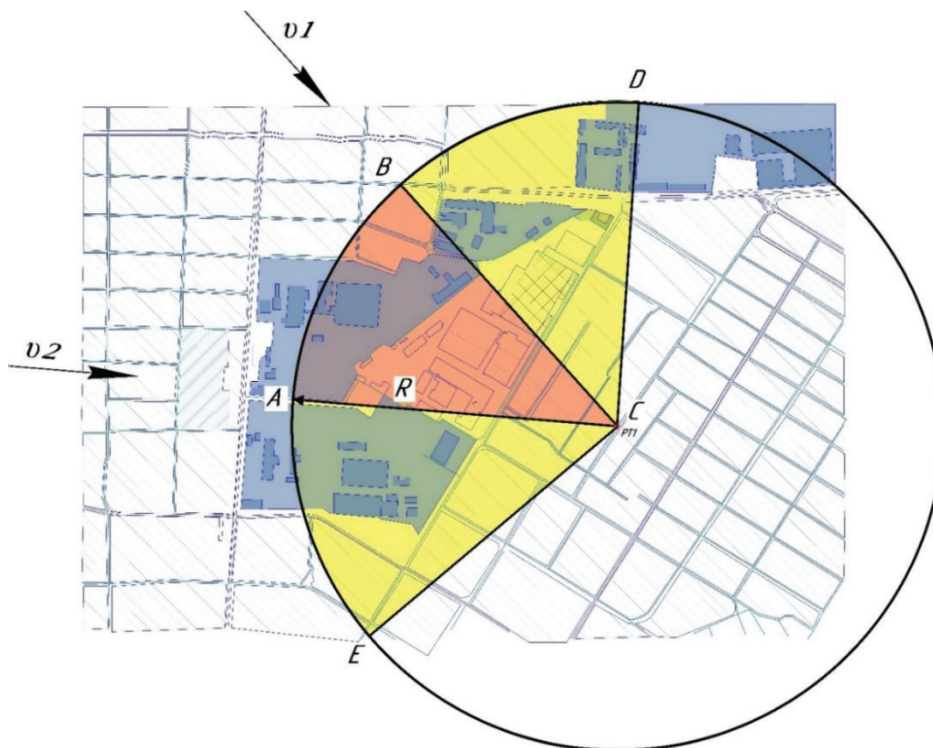


Рис. 1. Области расположения источников загрязнения атмосферы

Таблица 1

Расстояние от источника выбросов до точки максимальной концентрации загрязняющего вещества в зависимости от высоты источника и скорости ветра

Высота источника, м	Скорость ветра, м/с			
	0,5–2	3–4	5–7	10–12
2–10	6,5–199	17–272	26–380	47–564
10–20	27–310	69–455	103–675	188–1039
20–50	53–737	138–1163	205–1800	375–2867
50–120	127–1000	331–1648	494–2620	902–4240

Таблица 2

Радиус поиска источников загрязнения в зависимости от высоты источника и скорости ветра

Высота источника, м	Скорость ветра, м/с			
	0,5–2	3–4	5–7	10–12
до 10	400	560	760	1120
до 20	620	910	1350	2100
до 50	1480	2320	3600	5730
свыше 50	2000	3300	5200	8500

источников выбросов высотой от 2 до 120 м, диаметрами от 0,1 до 1 м и скоростью выхода газовой смеси от 2 до 25 м/с при различных скоростях ветра.

В табл. 1 представлены обобщенные результаты. Используя полученные данные, в зависи-

мости от скорости ветра задаем радиус поиска, равный удвоенному расстоянию до точки максимальной концентрации (табл. 2).

Пример установления радиуса поиска источников загрязнения в заданном секторе при скорости ветра 2 м/с представлен на рис. 2.



Рис. 2. Обозначение радиуса поиска источников загрязнения при скорости ветра 2 м/с

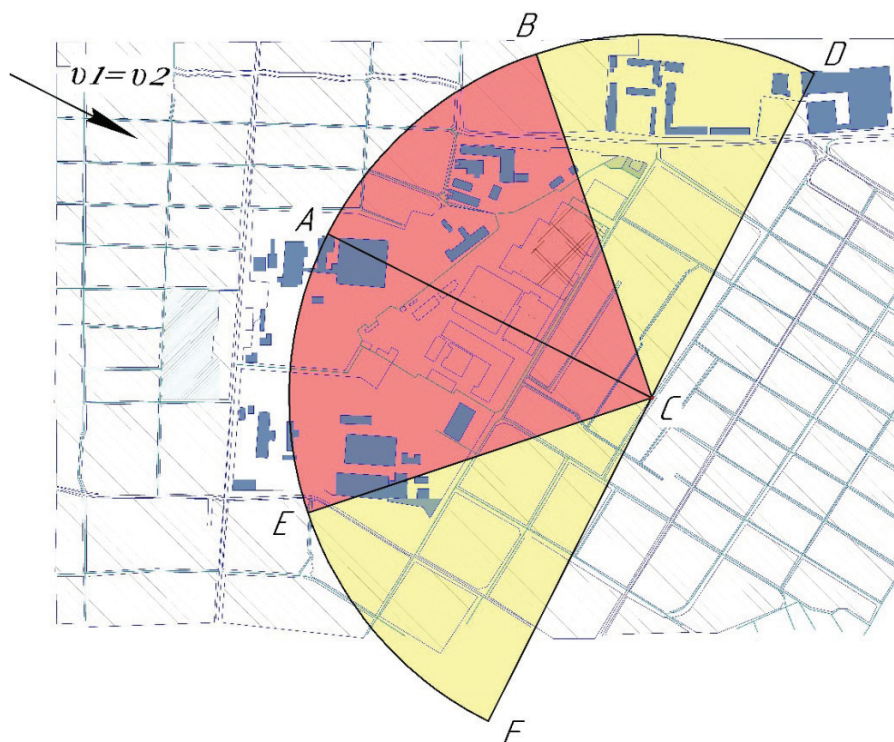


Рис. 3. Построение секторов вероятного расположения источника сверхнормативного загрязнения при  $v_1 = v_2$

Дополнительно определяются сектора  $BCD$  и  $ACE$ , внутри которых расположены источники, проверку которых проводят во вторую очередь. При этом выполняется условие:

$$\begin{aligned} BC \perp EC \\ AC \perp DC \end{aligned} \quad (1)$$

Источники, расположенные с подветренной стороны в секторе  $DCE$ , исключаются из дальнейшего анализа.

Построение секторов вероятного нахождения источника сверхнормативного выброса сводится к нескольким вариантам. Если зафиксировано превышение концентрации загрязняющего вещества и при этом направление ветра в момент поступления информации  $v_1$  не совпадает с направлением  $v_2$  при проведении отбора пробы, то сектора выстраиваются в соответствии с описанным выше алгоритмом. Если же направление ветра  $v_1$  совпадает с направлением  $v_2$ , в этом случае выстраиваются сектора  $ACB$  и  $ACE$  таким образом, что  $AC$  соответствует направ-

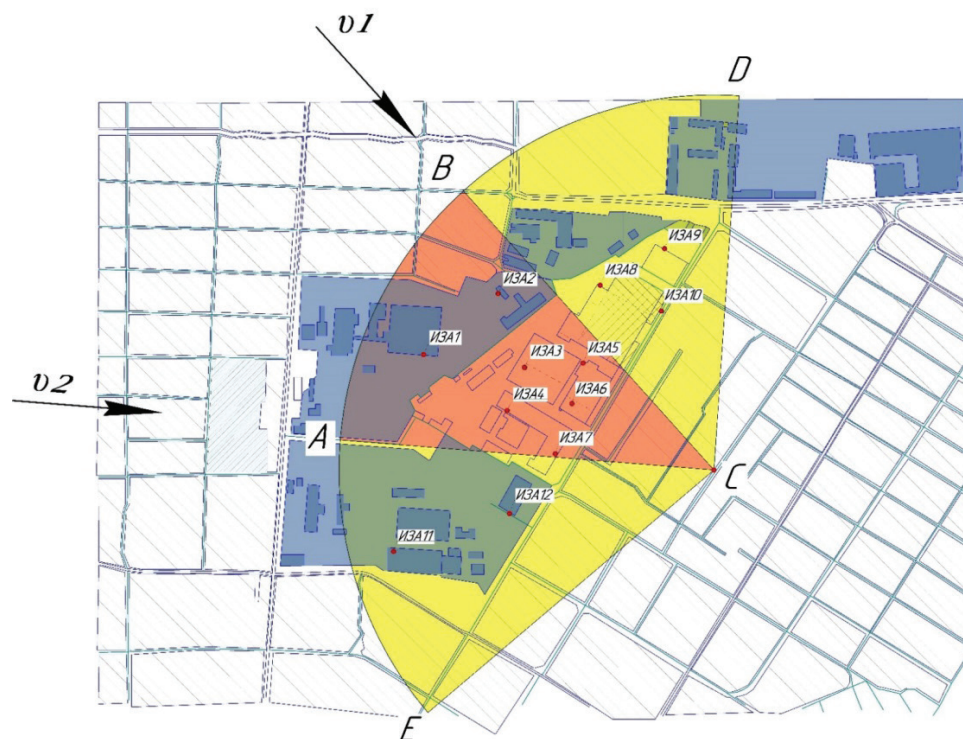


Рис. 4. Выявленные источники загрязнения, содержащие в выбросах искомое загрязняющее вещество

лению ветра  $v_2$ , а углы  $ACB$  и  $ACE$  равны  $45^\circ$  (рис. 3). Внутри полученного сектора  $ECB$  вероятность нахождения источника сверхнормативного выброса максимальна. Дополнительно достраиваются сектора с минимальной вероятностью нахождения источника  $BCD$  и  $ECF$  так, что:

$$\begin{aligned} DC \perp AC \\ FC \perp AC \end{aligned} \quad (2)$$

Еще один вариант возможен при зафиксированной скорости ветра  $v_2$ , равной  $0$  м/с (штиль). В этом случае предварительная оценка расположения источника сверхнормативного выброса производится как в первом случае, при условии, что за  $AC$  принимается направление ветра  $v_1$ , соответствующее направлению при поступлении жалобы на качество атмосферного воздуха.

В случаях, когда скорость ветра  $v_1$  или  $v_2$  равны  $0$  м/с (штиль) определение источника сверхнормативного выброса рассматриваемым способом невозможно, так как безветрие способствует накоплению примесей в приземном слое независимо от выбросов промышленных предприятий. Полный разворот ветра на  $180^\circ$  за время проведения предварительной оценки расположения источника сверхнормативного выброса также не рассматривается, потому как такое явление наблюдается крайне редко.

По полученной в результате отбора пробы информации о наименовании загрязняющего вещества в секторах  $ACB$ ,  $BCD$  и  $ACE$  определяются источники загрязнения, выбрасывающие в атмосферу установленное загрязняющее вещество (рис. 4). Данные по источникам загрязнения могут быть получены из служебной части Реестра

объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

**Результаты эксперимента.** Нами разработана программа, реализующая описанный алгоритм проведения предварительной оценки расположения источников загрязнения и вошедшая в ранее разработанную систему автоматического контроля загрязнения воздуха [14].

Результаты предварительной идентификации области расположения источников выброса визуализируются в геоинформационной системе GoogleEarth.

**Обсуждение результатов.** Полученные результаты будут использованы в дальнейшем при идентификации конкретных источников, допустивших сверхнормативный выброс.

**Выводы и заключение.** Предварительная оценка возможного расположения источника сверхнормативного выброса позволит:

1. Значительно сократить область поиска источника сверхнормативного выброса.
2. Сократить количество источников загрязнения для дальнейшего анализа и поиска.
3. Предварительно идентифицировать юридические лица, в отношении которых может потребоваться внеплановая проверка их деятельности.

#### Библиографический список

1. Доклад об экологической ситуации в Омской области за 2017 год / Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. Омск: ООО Омскбланкиздат, 2018. 300 с. ISBN 978-5-8042-0541-7.
2. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации по Омской области в 2017 году: материалы для гос. доклада / Управ-

ление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Омской области. Омск, 2018. 201 с.

3. Российская Федерация. Законы. О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля: федер. закон от 26 января 2008 г. № 294-ФЗ (последняя редакция). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_83079/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83079/) (дата обращения: 10.04.2019).

4. Дударов С. П. Модели самоорганизующихся искусственных нейронных сетей для идентификации промышленных источников загрязнения воздуха // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 1. С. 33–44.

5. Григорьев А. П. Основные задачи, решаемые искусственными нейронными сетями // Научная сессия ГУАП: сб. докл. В 3-х ч. Ч. 1. Технические науки. СПб., 2017. С. 72–76. ISBN 5-8088-0132-X.

6. Степанченко И. В., Крушель Е. Г. Об алгоритме идентификации неизвестного стационарного источника выбросов загрязняющих веществ // Математические методы в технике и технологиях // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ. 2016. № 10 (92). С. 168–171.

7. Kakarla A., Qureshi A., Shashidhar T. [et al.]. Source localization via aermod-based simulation under mean squared error criterion: Demonstration using field data // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 23–28 July, 2017 (Fort Worth, TX, USA). 2017. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128425.

8. Макоско А. А., Матешева А. В. Опыт идентификации источников химического загрязнения атмосферы в Московском регионе // Российский химический журнал. 2016. Т. 60, № 3. С. 113–120.

9. Матешева А. В. Идентификация стационарных источников загрязнения атмосферы на транспорте // Наука и техника транспорта. 2016. № 3. С. 20–25.

10. Щапова Л. В. Автоматизированная система поиска источника загрязнения атмосферы // Информационные технологии и автоматизация управления: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, работников образования и промышленности. ОмГТУ, 2018. С. 173–178.

11. Fu Z., Chen Y., Ding Y. [et al.]. Pollution Source Localization Based on Multi-UAV Cooperative Communication // IEEE Access. 2019. Vol. 7. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2900475.

12. Stojcsics D., Domozi Z., Molnar A. Air Pollution Localisation Based on UAV Survey // IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 7–10 Oct., 2018 (Miyazaki, Japan, Japan). 2018. DOI: 10.1109/SMC.2018.00436.

13. Yungaicela-Naula N. M., Zhang Y., Garza-Castañón L. E. [et al.]. UAV-based Air Pollutant Source Localization Using Gradient and Probabilistic Methods // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 12–15 June, 2018 (Dallas, TX, USA). 2018. DOI: 10.1109/ICUAS.2018.8453430.

14. Штриплинг Л. О., Баженов В. В., Варакина Н. С., Куприянова Н. П. Совершенствование системы мониторинга атмосферного воздуха в г. Омске // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 131–139.

**ШТРИПЛИНГ Лев Оттович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 9285-8565

AuthorID (РИНЦ): 157285

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

Адрес для переписки: los@omgtu.ru

**БАЖЕНОВ Владислав Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 9288-9566

AuthorID (РИНЦ): 646727

ORCID: 0000-0003-3749-166X

AuthorID (SCOPUS): 56503305700

ResearcherID: M-6511-2018

Адрес для переписки: bvv36@yandex.ru

**КАЛИНИН Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 7828-3231

AuthorID (РИНЦ): 206450

ORCID: 0000-0002-7773-0058

AuthorID (SCOPUS): нет

ResearcherID: нет

Адрес для переписки: ukalinin.conference@gmail.com

**БАЖЕНОВА Наталья Сергеевна**, аспирантка, ассистент кафедры «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 7666-3205

ORCID: 0000-0002-0983-746X

AuthorID (SCOPUS): 57200725159

ResearcherID: M-6532-2018

Адрес для переписки: n.s.v91@mail.ru

**МЕРКУЛОВ Василий Васильевич**, аспирант, ассистент кафедры «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 5478-3524

AuthorID (РИНЦ): 834906

ORCID: 0000-0001-9062-1297

ResearcherID: O-7758-2016

Адрес для переписки: mvv055@mail.ru

#### Для цитирования

Штриплинг Л. О., Баженов В. В., Калинин Ю. В., Баженова Н. С., Меркулов В. В. Метод предварительной локализации источника сверхнормативного загрязнения атмосферного воздуха как способ повышения эффективности экологического мониторинга и надзора в России // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 72–77. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-72-77.

Статья поступила в редакцию 29.04.2019 г.

© Л. О. Штриплинг, В. В. Баженов, Ю. В. Калинин,  
Н. С. Баженова, В. В. Меркулов