

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА  
СВЕРХНОРМАТИВНОГО ВЫБРОСА В АТМОСФЕРУ****Л.О. Штриплинг, В.В. Баженов, Н.С. Баженова, Е.Ю. Жемчугова**

ФГАОУ ВО Омский государственный технический университет,

РФ, г. Омск, Пр. Мира, 11

*E-mail: Losht59@mail.ru, n.s.v91@mail.ru*

Представлено описание метода и реализованной на его основе методики определения источника загрязнения атмосферы, выбросы которого привели к нарушению качества атмосферного воздуха, в условиях ограниченной точности расчетных методов и измерительных приборов. Локализация источника осуществляется путем сопоставления рассчитанных значений концентраций химических веществ и полученных значений передвижными лабораториями в двух точках с учетом метеорологических условий. Такой подход позволяет повысить точность предлагаемого метода и выявлять источники сверхнормативного загрязнения с вероятностью более 90%.

**Ключевые слова:** загрязнение, атмосферный воздух, сверхнормативный выброс, источник загрязнения атмосферы, локализация источника, концентрация химического вещества.

Поступила в редакцию: 03.02.2023. После доработки: 14.02.2023.

**Введение.** С 2014 года в Российской Федерации стартовала экологическая реформа, направленная на разработку мер по снижению негативного воздействия промышленных предприятий на окружающую среду. Регулярно вносятся изменения в природоохранное законодательство, проводятся эксперименты внедрения различных мероприятий в городах с наихудшими показателями состояния окружающей среды. Промышленные предприятия регулярно проводят обзор на предмет наилучших доступных технологий в области промышленной экологии, внедряют современные системы очистки, разрабатывают многолетние планы по снижению негативного воздействия на окружающую среду. Со стороны природоохранных государственных органов проводится анализ загрязнения и разработка мероприятий по снижению нагрузки на окружающую среду. Расширяются и дополняются современным оборудованием сети постов мониторинга качества водных объектов и атмосферного воздуха, с которых регулярно поступают сведения о состоянии наблюдаемых объектов окружающей среды. Разработан и внедрен в работу реестр объектов нега-

тивного воздействия (далее Реестр ОН-ВОС) [1], содержащая сведения об источниках загрязнения, их параметрах, качественном и количественном составе выбросов, сбросов и количестве образующихся отходов на производстве. Эта информация регулярно обновляется самими природопользователями и доступна природоохранным органам власти.

Воздухом человек дышит постоянно и поэтому любое нарушение его качества сразу вызывает у населения вопросы к промышленным предприятиям и органам власти. Несмотря на все проводимые меры и со стороны предприятий, и со стороны государственных органов власти, в средствах массовой информации регулярно появляется информация о фиксировании нарушений качества атмосферного воздуха. Однако при всей имеющейся информации до сих пор отсутствует действующий инструмент, позволяющий в короткие сроки определять источник загрязнения атмосферы (ИЗАВ), выбросы которого привели к нарушению качества атмосферного воздуха.

На сегодняшний день имеется достаточное количество различных разработок и применяемых методов, направленных

на локализацию и определение источника сверхнормативного выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Так, например, авторами работы [2] предлагается использование метода «отпечатков пальцев», основанного на анализе химического состава загрязнения, при котором вклады отдельных источников выявляются по соотношению заданного набора соединений. Для идентификации источника сверхнормативного выброса также может быть использована самоорганизующаяся нейронная сеть, машинное обучение [3] или беспилотные летательные аппараты, на которых установлены необходимые датчики [4, 5]. Хорошо известен и распространен метод факторного анализа Positive matrix factorization (PMF), достаточно подробно описанный в зарубежных источниках информации, например, в [6–8]. Разработанный нами метод идентификации источника сверхнормативного выброса, основанный на анализе концентраций загрязняющих веществ в двух точках местности, также представлен в ряде работ [9, 10].

При этом следует понимать, что все эти работы основаны на сборе и анализе информации о концентрациях загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, полученным в результате проведения отборов проб оборудованием, имеющим некоторые пределы погрешностей ( $\pm 15\text{--}20\%$ ). Также применяя для анализа расчетные методы, приходится неизбежно сталкиваться и с методической погрешностью, находящейся в диапазоне  $\pm 25\%$ . И если рассматривать проблему идентификации источника сверхнормативного выброса с этой точки зрения, то может показаться, что при такой точности делать выводы о причастности конкретного источника невозможно.

**Постановка цели исследования.** Исходя из вышеописанной проблемы сформулирована цель нашей работы: разработать методику локализации источника сверхнормативного выброса, обеспечивающую высокую точность определения такого источника при использовании инструментальных и расчетных данных.

**Методика локализации источника сверхнормативного выброса.** Как уже

указывалось выше, разработанный нами расчетно-экспериментальный метод идентификации источника сверхнормативного выброса предполагает использование инструментальных измерений и результатов расчета концентраций, создаваемых всеми источниками, действующими на территории населенного пункта. Суть метода заключается в определении источника сверхнормативного выброса загрязнения атмосферного воздуха по значениям концентраций загрязняющих веществ в двух точках, полученных от передвижных лабораторий. Представленный метод реализован в виде методики оперативного обнаружения источника сверхнормативного выброса. При проведении расчетов значений концентраций (на первых этапах) и массовых выбросов источников (на этапе идентификации источника) используются утвержденные на территории России «Методы расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе» [11].

В момент поступления информации о нарушении качества атмосферного воздуха (далее – информации), в соответствующий район города направляются две передвижные экологические лаборатории для проведения отборов проб воздуха. Параллельно по данным о метеорологических условиях проводится предварительный анализ расположения возможного источника сверхнормативного выброса. Более подробно с проведением предварительной оценки можно ознакомиться в работе [10]. Прибывшие на место, откуда поступила информация, лаборатории располагаются друг от друга на расстоянии 250–500 м и осуществляют одновременный отбор проб и определение уровня загрязнения приземного слоя атмосферы. По зафиксированному лабораториями превышению конкретного вещества или ряда веществ проводится анализ Реестра ОНВОС и выявляются источники, в выбросах которых содержится указанное вещество или ряд веществ.

Далее, по указанному веществу проводятся расчеты уровней концентраций, создаваемых установленными нормативными выбросами выявленных по Реестру ОНВОС источников и определяются

вклады каждого источника в точках проведения отборов проб. При проведении расчетов рассеивания загрязняющего вещества учитываются метеоусловия, наблюдаемые в момент проведения отборов проб. После того, как получены измеренные значения концентраций загрязняющего вещества и определены вклады каждого источника, можно переходить к определению массового выброса, который должен быть на конкретном рассматриваемом источнике, чтоб создать зафиксированные концентрации в точках отбора проб. Для этого поочередно выдвигается и проверяется гипотеза о виновности конкретного  $j$ -го источника в зафиксированном нарушении.

На первом шаге определяется концентрация примеси ( $C_x$ ) на расстоянии  $X_i$ , создаваемая на оси факела выброса  $j$ -го источника выбросов

$$C_x = \frac{C_{x,y}}{S_2}, \quad (1)$$

где  $C_{x,y}$  – известная (заданная или измеренная) концентрация загрязняющего вещества в  $i$ -ой точке на местности, наблюдаемая на расстоянии  $V_i$  по перпендикуляру к оси факела выброса. При этом, в случае рассмотрения влияния нескольких источников загрязнения, концентрация  $C_{x,y}$  будет определяться как разница между измеренным значением и концентрацией, создаваемой выбросами прочих источников (так называемой фоновой концентрацией).

По полученному значению концентрации  $C_x$  на оси факела, определяется максимальная концентрация  $C_m$  загрязняющего вещества, создаваемая источником

$$C_m = \frac{C_x}{S_1 \cdot r}, \quad (2)$$

где  $r$  – безразмерный коэффициент, зависящий от отношения наблюдаемой скорости ( $U$ ) к опасной скорости ветра.

Таким образом, массовый выброс загрязняющего вещества можно рассчитать по одной из формул:

при  $\Delta T > 0,5$

$$M_{j,i} = \frac{C_m \cdot H^2 \cdot \sqrt[3]{V \cdot \Delta T}}{A \cdot F \cdot n \cdot m \cdot \eta}, \quad (3)$$

для случаев предельно малых скоростей ветра и при  $-0,5 \leq \Delta T \leq 0$

$$M_{j,i} = \frac{C_m \cdot H^{\frac{7}{3}}}{A \cdot F \cdot m' \cdot \eta}, \quad (4)$$

для источников с холодными выбросами, т.е. при  $0 \leq \Delta T < 0,5$

$$M_{j,i} = \frac{H^{\frac{4}{3}} \cdot C_m}{A \cdot F \cdot n \cdot \eta \cdot K}, \quad (5)$$

где  $i$  – номер точки, в которой измерялась концентрация,  $j$  – номер источника загрязнения,  $m'$  – коэффициент, учитывающий условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;  $K$  – вспомогательный коэффициент расчета при холодных выбросах.

Порядок определения массового выброса загрязняющего вещества из устья источника по данным о значении концентрации в  $i$ -ой точке представлен в виде блок-схемы алгоритма на рис. 1.

Расчет массового выброса проводится по значениям измеренных концентраций в двух точках для каждого источника (рис. 2), поэтому в случае виновности источника в сверхнормативном загрязнении, рассчитанные массы выбросов должны быть равны, но ввиду погрешности измерительных приборов и расчетных методов концентраций равенство примет следующий вид

$$\begin{aligned} M_{j,1} \cdot (1 + \delta_1) \cdot (1 + \lambda_1) &\approx \\ &\approx M_{j,2} \cdot (1 + \delta_2) \cdot (1 + \lambda_2), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\delta$  – паспортная погрешность измерительного прибора,  $\lambda$  – методическая погрешность при расчете  $j$ -го источника.

Далее для каждого источника определяется показатель  $I_j$

$$I_j = \frac{M_{j,1} \cdot (1 + \delta_1) \cdot (1 + \lambda_1)}{M_{j,2} \cdot (1 + \delta_2) \cdot (1 + \lambda_2)}. \quad (7)$$

Ввиду того, что расчеты полей концентраций загрязняющего вещества для любого  $j$ -го источника проводятся единожды, методические погрешности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  будут равны. Следовательно, методической погрешностью в данном случае можно пренебречь.

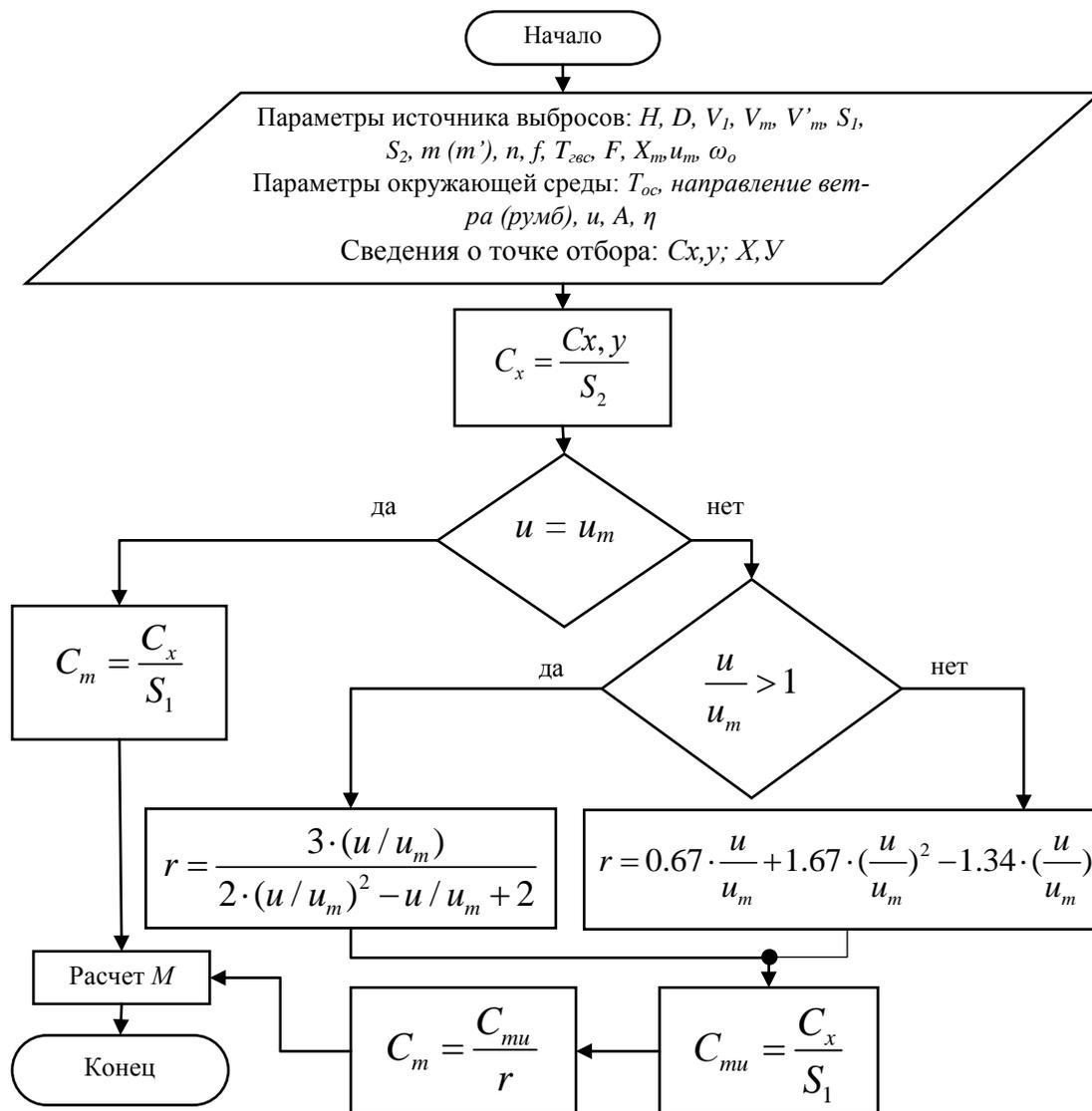


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета массового выброса одиночного стационарного источника по измеренной концентрации в некоторой точке

Fig. 1. Block-diagram of the algorithm for calculating the mass emission of a single stationary source based on the measured concentration at a certain point

Соотношение  $\frac{(1 + \delta_1)}{(1 + \delta_2)} = K$  – является величиной постоянной, поскольку формируется единожды при проведении одного замера в каждой точке.

Исходя из вышеизложенного, выражение (7) примет вид

$$I_j = K \cdot \frac{M_{j,1}}{M_{j,2}} \quad (8)$$

В случае виновности рассматриваемого j-го источника отношение рассчитанных массовых выбросов будет стре-

миться к единице, при этом значение коэффициента  $K$  с вероятностью 95,45% будет находиться в диапазоне значений 0,9...1,1, поэтому для большей наглядности преобразуем выражение (8)

$$N_j = |I_j - 1| \quad (9)$$

По результатам проведения всех расчетов составляется матрица следующего вида

$$\begin{pmatrix} \text{ИЗАВ}_1 & M_{1,1} & M_{1,2} & N_1 \\ \text{ИЗАВ}_2 & M_{2,1} & M_{2,2} & N_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{ИЗАВ}_j & M_{j,1} & M_{j,2} & N_j \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Далее сравнивается  $N_j$  и тот его показатель, который будет наиболее близок к значению «0» с вероятностью более 90%, будет соответствовать виновному ИЗАВ.

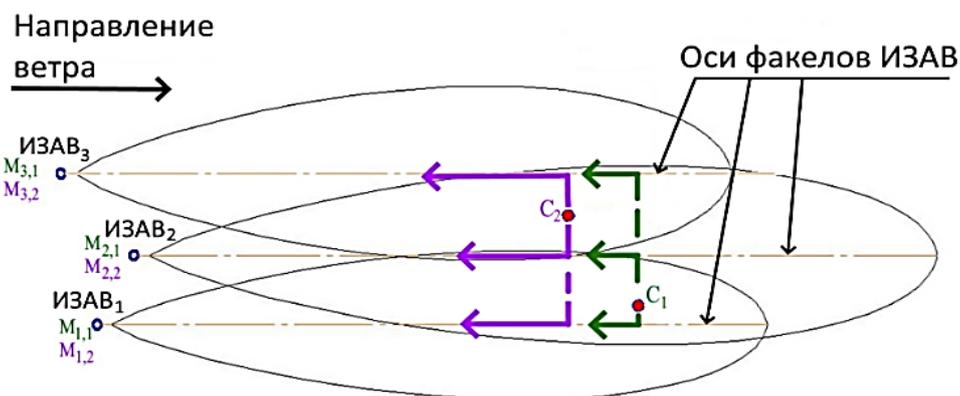


Рис. 2. Принцип расчета массового выброса для источников по измеренным концентрациям в двух точках

Fig.2. The principle of calculating mass emissions for sources based on measured concentrations at two points

**Результаты и выводы.** Представленная методика была экспериментально апробирована с использованием результатов передвижной экологической лаборатории Центра экологического мониторинга и оперативного реагирования Министерства природных ресурсов и экологии Омской области.

По представленным протоколам отборов проб воздуха в период с 6 по 7

августа 2020 года в трех административных округах города были зафиксированы превышения допустимой концентрации сероводорода от 1,1 ПДК до 28,7 ПДК. На территории города по данным Реестра ОНВОС зарегистрировано 1652 источника, выбросы которых содержат сероводород. На рис. 3 показана карта рассеивания сероводорода от всех источников, зарегистрированных и

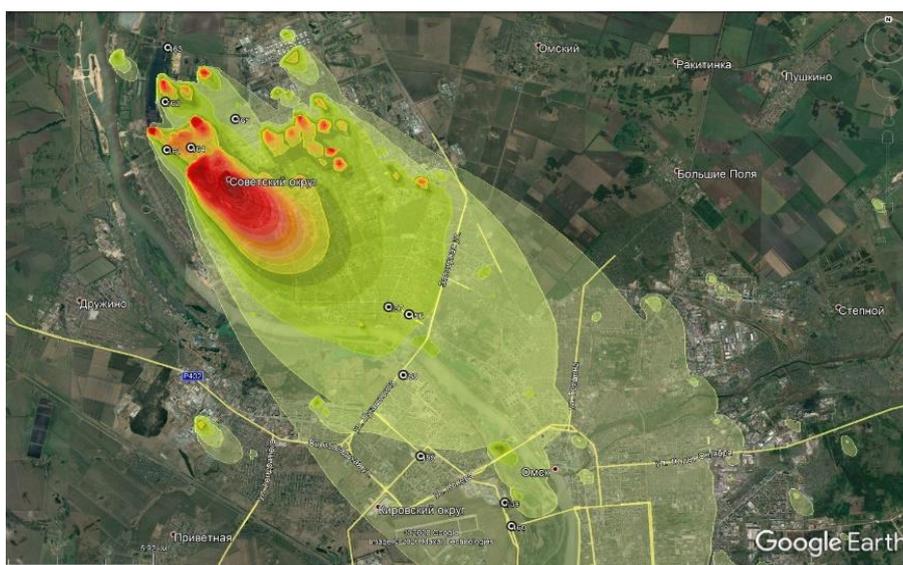


Рис. 3. Поля концентраций сероводорода  
Fig. 3. Fields of hydrogen sulfide concentrations

расположенных на территории города, с учетом метеорологических условий, при которых проводились отборы проб.

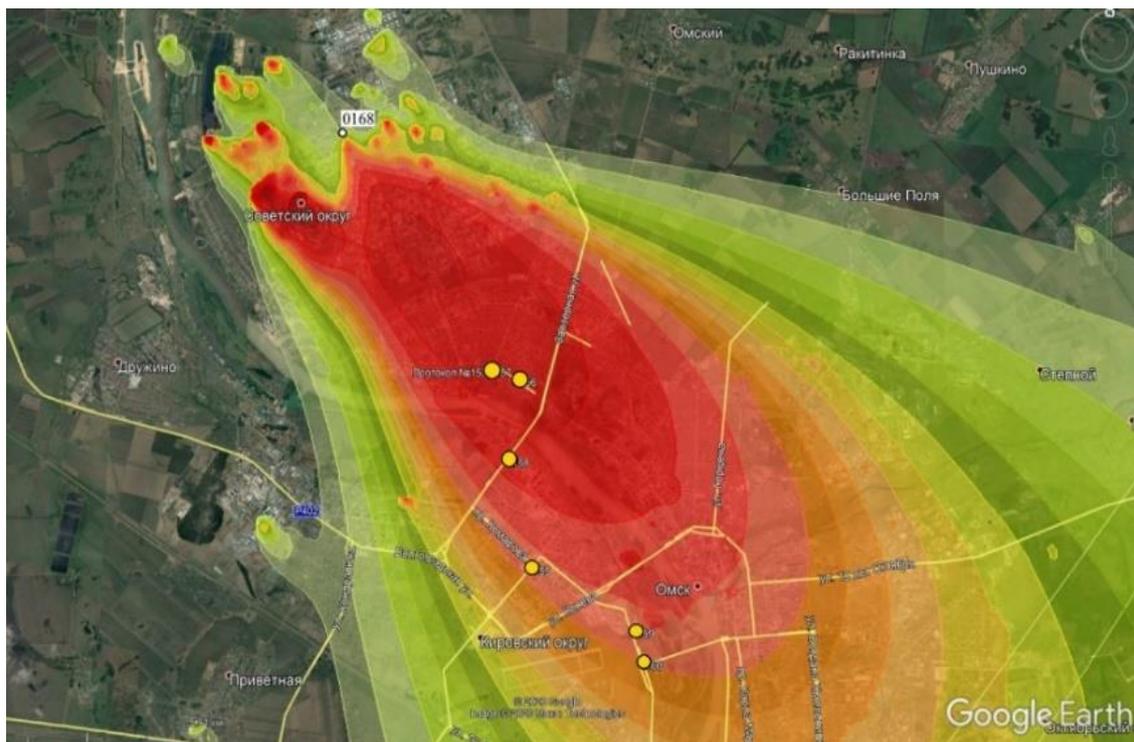
Значения массовых выбросов приняты на уровнях установленных нормативов для каждого источника.

Для проведения расчетов по выявлению источника сверхнормативного выброса были приняты значения концентраций двух протоколов таким образом, чтоб разница во времени между измерениями составляла менее 3-х часов. Выборка результатов проведенных расчетов в соответствии с представленной выше методикой приведена в табл. 1.

Дополнительно рассчитывался параметр  $P$  – кратность превышения рассчитанной массы выброса над установленным нормативом для источника. Используя значения этого параметра, сокращено количество источников загряз-

нения в представленной выборке. Таким образом, в табл. 1 указаны источники, для которых кратность превышения установленного норматива выброса  $P \leq 1000$ .

По представленным результатам был сделан вывод о причастности источника под номером 0168 к сверхнормативному загрязнению. Проведенные расчеты рассеивания с учетом увеличения массового выброса предполагаемого источника до рассчитанного значения также показали сходимость рассчитанных концентраций с другими представленными протоколами отборов проб (желтые точки на рис. 4). Результаты были переданы в Минприроды Омской области для проведения внеплановой проверки предприятия, в ходе которой были подтверждены сделанные выводы.



**Рис. 4.** Поля концентраций сероводорода при увеличении массового выброса на источнике  
**Fig. 4.** Fields of hydrogen sulfide concentrations with an increase in mass emission at the source

**Закключение.** В результате проведенных экспериментов методика подтвердила свою адекватность и точность в определении источника сверхнормативного выброса. Таким образом, разработанный метод позволяет компенсировать неточ-

ности при использовании инструментальных измерений и расчетных методов для выявления источника, выбросы которого повлекли нарушение качества атмосферного воздуха, и обеспечить точность свыше 90% при его локализации.

**Таблица 1.** Выборка результатов обработки данных отборов проб, проведенных 7 августа 2020 г. передвижной лабораторией

Метеоусловия: T = 15,5°C; скорость ветра V = 1 м/с; направление – 135° (СЗ)

Количество ИЗАВ сероводородом в населенном пункте M = 1652;

Количество ИЗАВ, попавших в сектор влияния m = 983

Расположение постов:

Пост 1. Координаты X = 73.294762 Y = 55.026128

Пост 2. Координаты X = 73.284870 Y = 55.028065

Протокол 156 C<sub>изм</sub> = 0,020, мг/м<sup>3</sup>

Протокол 157 C<sub>изм</sub> = 0,025, мг/м<sup>3</sup>

№ п/п	Номер источника госрестра	Координаты источника		№ поста	Расчётные концентрации, мг/м <sup>3</sup>		M <sub>расч</sub> г/с	M <sub>пдв</sub> г/с	P=M <sub>расч</sub> /M <sub>пдв</sub>	N <sub>j</sub>
		X	Y		Фон в точках замера	C, мг/м <sup>3</sup>				
1	6195	73.22988	55.063806	1	0,00184	0,01816	18,9957	0,045	422,1263	0,1389
				2	0,00213	0,02286	22,0608	0,045	490,2396	
2	0992	73.201029	55.06263	1	0,00169	0,01831	18,721	0,166	112,7769	0,3681
				2	0,0019	0,0231	13,6841	0,166	82,43442	
4	6145	73.229879	55.063804	1	0,00186	0,01814	6,47381	0,0085	761,6244	0,1324
				2	0,00214	0,022853	5,71675	0,0085	672,559	
5	1029	73.2219	55.06424	1	0,00187	0,01813	33,6164	0,0368	913,489	0,21
				2	0,00215	0,02285	27,7811	0,0368	754,9217	
6	6178	73.229871	55.063802	1	0,00185	0,01815	22,2685	0,0383	581,4218	0,3309
				2	0,00213	0,022872	16,7323	0,0383	436,8753	
7	6224	73.229779	55.063805	1	0,00186	0,01814	18,9612	0,0291	651,5875	0,3415
				2	0,00213	0,022867	14,1344	0,0291	485,7168	
8	0168	73.216791	55.076863	1	0,00170	0,0183	113,563	0,9323	121,8097	0,0466
				2	0,00198	0,023017	108,508	0,9323	116,3877	
9	6333	73.229875	55.063824	1	0,00187	0,01813	17,5559	0,0187	938,8199	0,3156
				2	0,00215	0,022851	13,3440	0,0187	713,5851	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
983	6353	73.229859	55.063502	1	0,00186	0,01814	8,27569	0,0107	773,4294	0,3144
				2	0,00214	0,02286	6,2963	0,0107	588,4388	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программно-техническое обеспечение ведения учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. – URL: <https://uonvos.rpn.gov.ru> (дата обращения: 16.01.2023).
2. Yang, H., Tseng, Y., Chuang, H., Li, T., Yuan, C., & Lee, J.J. Chemical Fingerprint and Source Identification of Atmospheric Fine Particles Sampled at Three Environments at the Tip of Southern Taiwan // *Aerosol and Air Quality Research*. 2017. № 17, pp. 529–542.
3. Zhangjie Fu, Yiming Chen, Yongjie Ding, Daojing He. Pollution Source Localization Based on Multi-UAV Cooperative Communication // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 29304–29312.
4. Noe M. Yungaicela-Naula, Youmin Zhang, Luis E. Garza-Castañon, Luis I. Minchala. 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), pp. 702–707.
5. Zhang S. Pollution Transport Simulation and Machine-Learning Aided Source Detection in Metropolitan Areas // *2020 International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*. 2020, pp. 359–364.
6. Positive matrix factorization (PMF) // U.S. Environmental Protection Agency. - URL: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf\\_5.0\\_user\\_gui-de.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_gui-de.pdf) (дата обращения: 11.05.2022).
7. Park M., Lee T.V., Lee E., Kim D. Enhancing source identification of hourly PM2.5 data in Seoul based on a dataset segmentation scheme by positive matrix factorization (PMF) // *Atmospheric Pollution Research*. 2019. Vol. 10. No. 4, pp. 1042–1059.
8. Begum B.A., Hopke P.K. Identification of Sources from Chemical Characterization of Fine Particulate Matter and Assessment of Ambient Air Quality in Dhaka, Bangladesh // *Aerosol and Air Quality Research*. 2019. Vol. 19, pp.118–128.
9. Shtripling L.O., Bazhenov V.V., Varakina N.S., Kupriyanova N.P. Development of unauthorized airborne emission source identification procedure // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. P. 012105.
10. 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.
11. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 N 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе». - URL: [http://www.consul-tant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_222765](http://www.consul-tant.ru/document/cons_doc_LAW_222765) (дата обращения: 20.12.2022).

ENSURING THE RELIABILITY OF IDENTIFYING THE SOURCE OF EXCESS EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

L.O. Shtripling, V.V. Bazhenov, N.S. Bazhenova, E.Yu. Zhemchugova

Omsk State Technical University, RF, Omsk, Mira Av., 11

The method and the methodology implemented on its basis for determining the source of atmospheric pollution, the emissions of which led to a violation of the quality of atmospheric air, in conditions of limited accuracy of calculation methods and measuring instruments is introduced. Localization of the source is carried out by comparing the calculated values of chemical concentrations and the values obtained by mobile laboratories at two points, taking into account meteorological conditions. This approach makes it possible to increase the accuracy of the proposed method and identify sources of excess pollution with a probability of more than 90%.

**Keywords:** pollution, atmospheric air, excess emission, source of atmospheric pollution, localization of the source, concentration of a chemical substance.

#### REFERENCES

1. <https://uonvos.rpn.gov.ru> (January 16, 2023).
2. Yang H., Tseng Y., Chuang H., Li T., Yuan C., and Lee J.J. Chemical Fingerprint and Source Identification of Atmospheric Fine Particles Sampled at Three Environments at the Tip of Southern Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, Vol. 17, pp. 529–542.
3. Zhangjie Fu, Yiming Chen, Yongjie Ding, and Daojing He. Pollution Source Localization Based on Multi-UAV Cooperative Communication. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 29304–29312.
4. Noe M. Yungaicela-Naula, Youmin Zhang, Luis E. Garza-Castañon, and Luis I. Minchala. 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), pp. 702–707.
5. Zhang S. Pollution Transport Simulation and Machine-Learning Aided Source Detection in Metropolitan Areas. *2020 International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*, 2020, pp. 359–364.
6. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf\\_5.0\\_user\\_guide.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf) (May 11, 2022).
7. Park M., Lee T.V., Lee E., and Kim D. Enhancing source identification of hourly PM<sub>2.5</sub> data in Seoul based on a dataset segmentation scheme by positive matrix factorization (PMF). *Atmospheric Pollution Research*, 2019, Vol. 10, No 4, pp. 1042–1059.
8. Begum B.A. and Hopke P.K. Identification of Sources from Chemical Characterization of Fine Particulate Matter and Assessment of Ambient Air Quality in Dhaka, Bangladesh. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, Vol. 19, pp. 118–128.
9. Shtripling L.O., Bazhenov V.V., Varakina N.S., and Kupriyanova N.P. Development of unauthorized airborne emission source identification procedure. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, p. 012105.
10. Shtripling L.O., Bazhenov V.V., Kalinin Yu.V., Bazhenova N.S., and Merkulov V.V. Metod predvaritel'noj lokalizacii istochnika sverhnormativnogo zagrjaznenija atmosfernogo vozduha kak sposob povyshenija jeffektivnosti jekologicheskogo monitoringa i nadzora v Rossii (Method of preliminary localization of the source of excess atmospheric air pollution as a way to increase the effectiveness of environmental monitoring and supervision in Russia). *Omskij nauchnyj vestnik*, 2019, Vol. 3, No. 165, pp. 72–77.
11. [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_222765](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_222765) (December 20, 2022).