

## Картографирование загрязнения атмосферного воздуха города с использованием мобильных пылемеров серии AirExpert Mini

*Аликов А.В.<sup>1</sup>, Бакин Н.С.<sup>1</sup>, Брызгина Е.О.<sup>2</sup>, Сущенко Р.В.<sup>1</sup>,  
Мензелинцева Н.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup>Российский университет транспорта

<sup>3</sup>Волгоградский государственный университет

**Аннотация:** Проведено картографирование загрязнения атмосферного воздуха отдельных районов городов Обнинск, Дубна, Санкт-Петербург, Курск, Москва, Волгоград (2019-2024 гг.), что позволило оперативно в режиме реального времени оценить экологическую ситуацию в исследуемом районе, тем самым детализировать данные стационарных постов мониторинга.

**Ключевые слова:** мобильные пылемеры, мониторинг, референтный прибор, точность замеров, картографирование загрязнения, гиперлокальный мониторинг.

Улучшение экологической обстановки в Российской Федерации для формирования комфортной среды обитания, повышения качества и продолжительности жизни россиян является целью национального проекта России «Экология» на 2019-2024 гг. В свою очередь, мониторинг атмосферного воздуха считается одной из приоритетных задач в области экологии, так как непосредственно связан со здоровьем населения и качеством окружающей среды [1]. Исследования, посвященные данному вопросу, рассматриваются в работах [2-4]. Снижение уровня загрязнения воздушной среды в крупных промышленных городах невозможно обеспечить без применения самых передовых технологий по контролю, учету и анализу загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

Одной из таких технологий является картографирование пространственно-временного распределения концентрации вредных веществ в атмосфере населенных мест с созданием соответствующих баз данных.

В последние 5-7 лет за рубежом активно проводятся исследования по применению газоанализаторов и пылемеров нового поколения для

гиперлокального мониторинга и картографирования атмосферного воздуха населенных мест [5, 6]. Разработаны международные рекомендации, стандарты, директивы, реализованы программы по тестированию нового поколения мобильных газоанализаторов и пылемеров на базе бюджетных сенсоров как дополнение к существующим национальным сетям по наблюдению за качеством атмосферного воздуха. Промышленные предприятия многих стран приступили к серийному выпуску мобильных и стационарных газоанализаторов и пылемеров на базе бюджетных сенсоров [7].

Российский Росгидромет считает, что применение мобильных газоанализаторов и пылемеров на базе бюджетных сенсоров является следующим шагом в развитии государственной системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. В настоящее время мониторинг атмосферного воздуха осуществляется, в основном, стационарными постами наблюдения, что с учетом низкой плотности наблюдательной сети не отражает полной картины качества атмосферного воздуха в населенных пунктах, что отражается в работах российских авторов [8-10].

Однако проведенные исследования наряду с существенными преимуществами мобильных устройств, (цена, размер, вес, мобильность и количество потребляемой электроэнергии) отмечают, что они, как правило, имеют ряд недостатков: достаточно короткий срок службы, существенное влияние на показания влажности воздуха, невысокая селективность, перекрестная чувствительность, вероятность «отравления», ежедневный дрейф нулевой отметки. Это может быть компенсировано потенциальным увеличением пространственной плотности измерений, достигаемой за счет сети датчиков (20 и более устройств).

В нашей стране ООО «СоюзАтомПрибор» разработал новые малогабаритные мобильные газоанализаторы и пылемеры серии AirExpert

---

Mini. Они предназначены для гиперлокального мониторинга и картографирования концентрации вредных химических веществ населенных мест. Датчики определяют концентрацию вредных веществ, в том числе, мелкодисперсной пыли ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ), метеопараметры, координаты на местности, время, обеспечивают передачу данных по сети. На основании мониторинга маршрутов движения при использовании пешеходов, велосипедов, электрического городского транспорта, автомобилей и т.п. может быть создана база данных пространственно-временного распределения концентрации вредных веществ на исследуемой территории, тем самым детализирована общая картина состояния воздушной среды в городе. Одним из условий использования мобильных датчиков в целях картографирования является соответствующая оценка точности.

С целью определения точности измерений мобильных пылемеров серии AirExpert на основе оптических сенсоров OPC-R1/OPC-N3 проведены полевые исследования на стационарной станции мониторинга воздуха «Шаболовка» Государственного природоохранного бюджетного учреждения «Мосэкомониторинг» г. Москва. Станция оснащена анализатором пыли TEOM серии 1405 (референтный прибор), который установлен внутри павильона. Мобильные пылемеры AirExpert Mini PM и сенсоры OPC-N3 были установлены рядом с павильоном в специальном метеорологическом домике (рис.1.).



Рис. 1. – Полевые исследования мобильных пылемеров серии AirExpert

Полевые исследования характеристик мобильных пылемеров проводились в соответствии с Европейскими рекомендациями. Свойства аэрозоля (т.е. плотность частиц, показатель преломления, распределение по размерам и химический состав) в течение всего эксперимента изменялись незначительно; факторы влияния имели несущественную разницу в интервалах выборки, измерения из интервала выборки являлись репрезентативными для этого периода года.

При обработке данных были применены алгоритмы коррекции распределения частиц по размерам (основанный на теории к-Келера) для учета гигроскопического роста частиц при изменении влажности; оценки вклада частиц ниже предела обнаружения диаметра 0,3 мкм; а также использован поправочный коэффициент для масштабирования рассчитанных значений концентраций пыли в соответствии с измерениями референтного прибора.

Согласно директиве Европейского парламента и Совета от 21 мая 2008 г. «О качестве окружающего воздуха и более чистом воздухе в Европе», определены основные показатели (метрики) оценки качества измерения концентрации пыли  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  пылемерами AirExpert, проведено сравнение полученных значений с показаниями референтного прибора TEOM серии 1405, выборочные значения приведены в табл.1

Таблица № 1

Оценка качества измерений концентрации мелкодисперсной пыли пылемерами AirExpert

№ п/п	Показатель	Значение для AirExpert		
		Сенсор OPC-R1	Сенсор OPC-R3	
1	Коэффициент Пирсона, $R^2$ Рекомендуемое значение $R^2 \geq 0,70$	$PM_{2,5}$	0,852	0,846
		$PM_{10}$	0,863	0,853
2	Среднеквадратичная погрешность, RMSE, $мкг/м^3$ Рекомендуемое значение $RMSE \leq 7 мкг/м^3$	$PM_{2,5}$	1,661	1,783
		$PM_{10}$	3,501	3,472
3	Нормированная среднеквадратичная погрешность, NRMSE, % Рекомендуемое значение $NRMSE \leq 30\%$	$PM_{2,5}$	22,076	23,728
		$PM_{10}$	27,286	27,134
4	Стандартное отклонение, SD, $мкг/м^3$ Рекомендуемое значение $SD \leq 5 мкг/м^3$	$PM_{2,5}$	3,593	3,817
		$PM_{10}$	6,02	6,302
5	Средняя абсолютная погрешность (по модулю), MAPE, %	$PM_{2,5}$	20,92	21,24
		$PM_{10}$	20,49	20,96

На рис. 2 дано сравнение показаний мобильных измерителей концентрации пыли AirExpert Mini PM и показаний референтного анализатора пыли TEOM 1405, по мелкодисперсной пыли  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ .

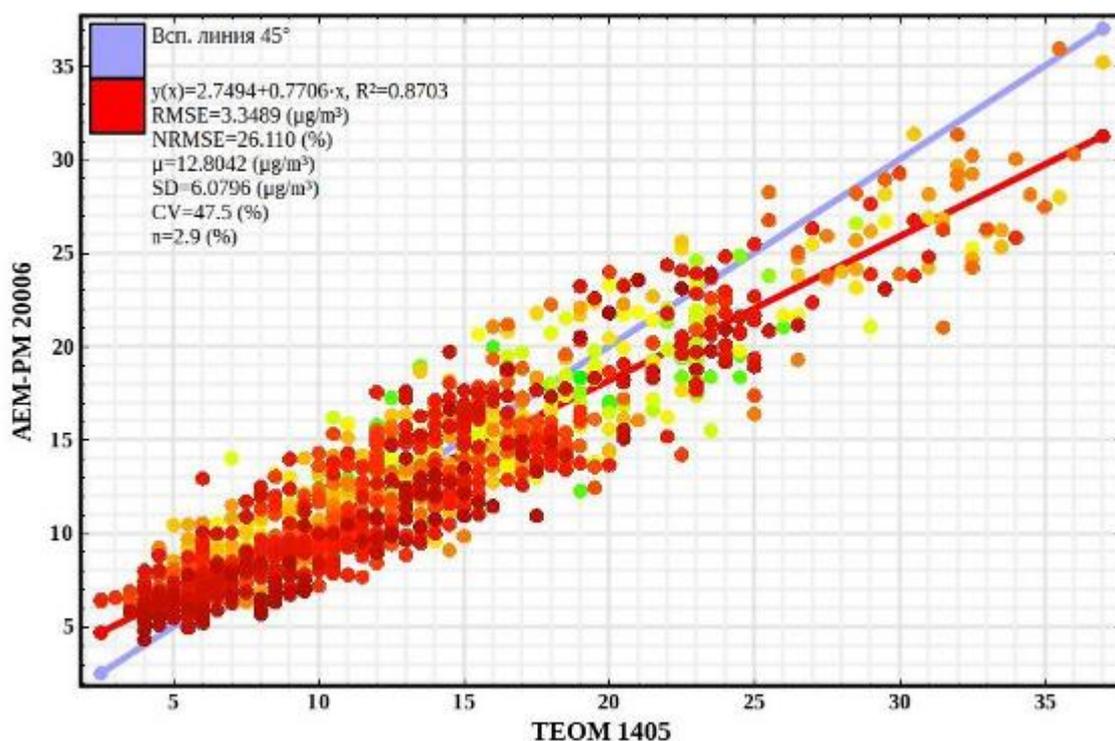


Рис. 2. – Сравнение показаний мобильных измерителей концентрации пыли AirExpert Mini PM и показаний референтного анализатора пыли TEOM 1405 по мелкодисперсной пыли  $\text{PM}_{2.5}$  и  $\text{PM}_{10}$ .

Основным показателем, который определяет соответствие точности замеров концентрации пыли мобильными измерителями, является относительная расширенная неопределенность (REU). Если величина  $\text{REU} \geq 50\%$ , то мобильный измеритель концентрации мелкодисперсной пыли  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  соответствует требованиям, предъявляемым к средствам измерения качества атмосферного воздуха населенных мест.

На рис.3 приведены графики REU после обработки данных сравнения AirExpert Mini PM с TEOM-1405 для пыли  $\text{PM}_{10}$  с усреднением 20 мин.

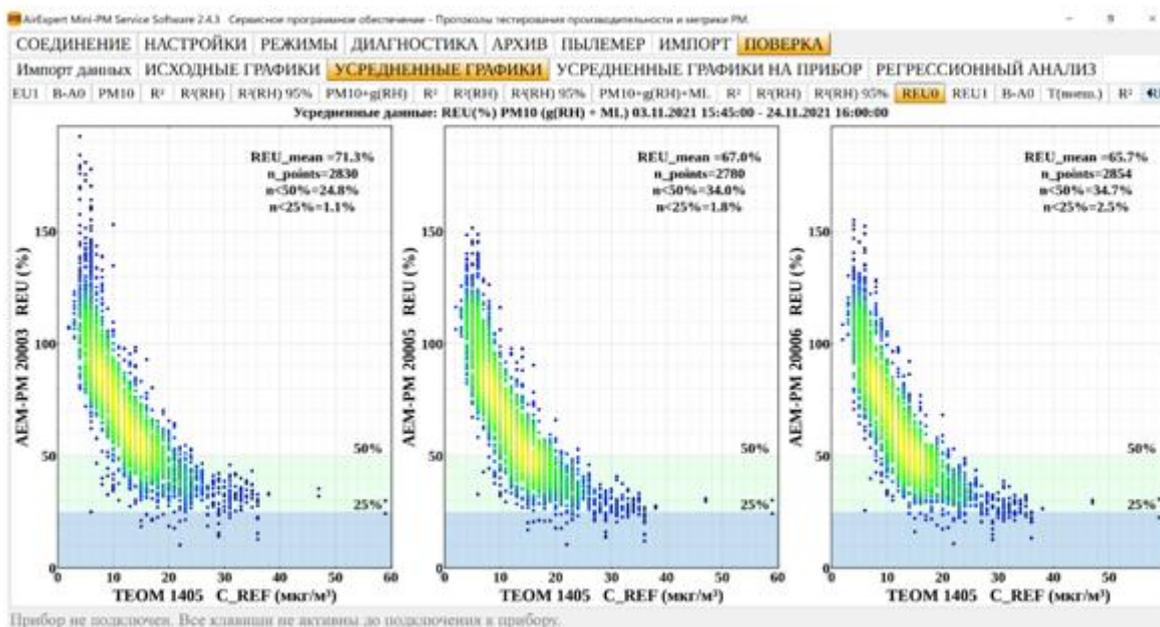


Рис. 3. – Графики относительной расширенной неопределенности (REU) после обработки данных сравнения AirExpert Mini PM с TEOM-1405, по пыли  $\text{PM}_{10}$  с усреднением 20 мин.

Анализ полученных результатов показал, что средняя абсолютная погрешность по модулю (МАРЕ) при измерении концентрации пыли  $\text{PM}_{10}$  за период исследований составил 20,5%, при измерении концентрации пыли  $\text{PM}_{2,5}$  – 20,9%. Относительная расширенная неопределенность REU при замерах концентрации  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  – менее 50%. Таким образом, точность мобильных датчиков AirExpert Mini PM соответствует требованиям, предъявляемым точности средств измерений качества атмосферного воздуха населенных мест.

На протяжении 2019-2024 гг. мобильные пылемеры AirExpert были использованы при картографировании загрязнения атмосферного воздуха отдельных районов городов Обнинск, Дубна, Санкт-Петербург, Курск, Москва, Волгоград. На рис.4 приведены результаты картографирования загрязнения атмосферы г. Москвы (2021 г.), а также изменение концентрации частиц  $\text{PM}_1$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  и  $\text{PM}_{10}$ , температуры T и влажности воздуха RH. На рис. 5

результаты картографирования загрязнения атмосферы в г. Обнинск (2021 г.), а также изменение концентрации  $PM_{2,5}$ , температуры  $T$  и влажности воздуха  $RH$ .

На основании полученных результатов можно не только оперативно в режиме реального времени оценить экологическую ситуацию в исследуемом районе, но также отнести рассматриваемую территорию к определенной зоне по уровню экологического риска, определить гиперлокальные зоны загрязнения воздуха, разработать и обосновать очередность мероприятий по предотвращению загрязнения атмосферы и минимизировать затраты.

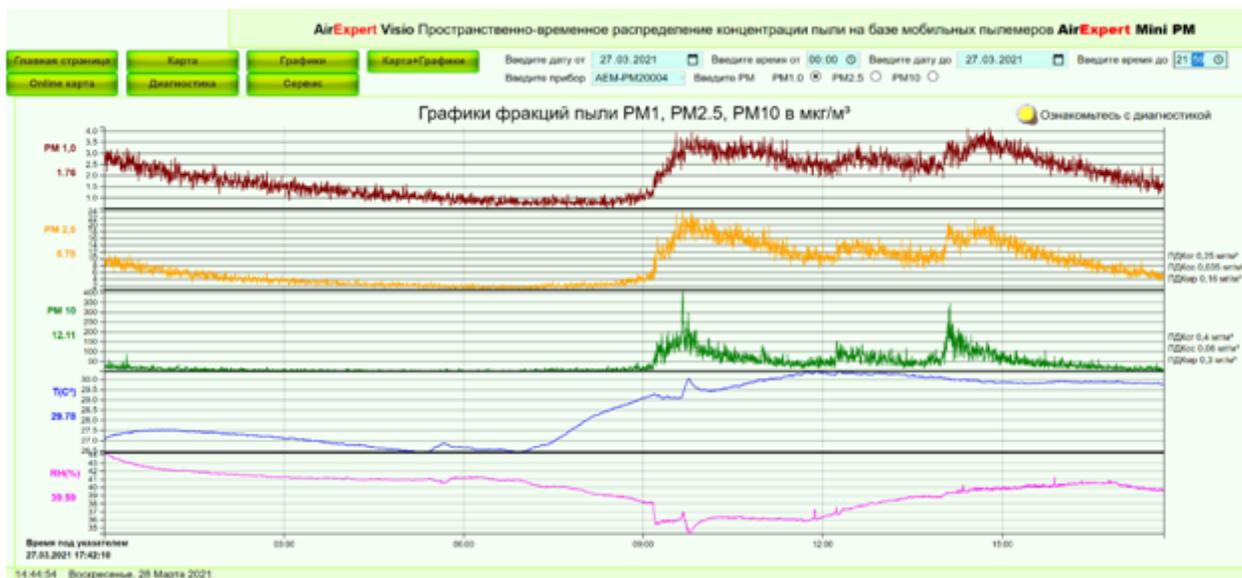


Рис. 4. – Результаты картографирования загрязнения атмосферы г. Москвы (2021 г.), а также изменение концентрации частиц  $PM_1$ ,  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ , температуры  $T$  и влажности воздуха  $RH$ .



Рис. 5. – Результаты картографирования загрязнения атмосферы в г. Обнинск (2021 г.), а также изменение концентрации  $PM_{2,5}$ , температуры  $T$  и влажности воздуха  $RH$ .

Таким образом, проведены полевые испытания мобильных пылемеров серии AirExpert на основе оптических сенсоров OPC-R1 / OPC-N3 на стационарной станции мониторинга воздуха «Шаболовка» (ГПБУ «Мосэкомониторинг», г. Москва), оснащенной анализатором пыли TEOM серии 1405. Проведено сравнение значений показателей (метрик) мобильных пылемеров и показаний референтного прибора. Точность мобильных датчиков AirExpert Mini PM соответствует требованиям, предъявляемым точности средств измерений качества атмосферного воздуха населенных мест: средняя абсолютная погрешность по модулю (МАРЕ) при измерении концентрации пыли  $PM_{10}$  за период исследований составил 20,5%, при измерении концентрации пыли  $PM_{2,5}$  -

20,9%, относительная расширенная неопределенность REU при замерах концентрации  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  - менее 50%.

Картографирование загрязнения атмосферного воздуха районов городов Обнинск, Дубна, Санкт-Петербург, Курск, Москва, Волгоград (2019-2024 гг.) позволило оперативно в режиме реального времени оценить экологическую ситуацию в исследуемом районе, определить гиперлокальные зоны загрязнения воздуха, тем самым детализировать данные стационарных постов мониторинга, разработать и обосновать очередность мероприятий по предотвращению загрязнения атмосферы и минимизировать затраты.

### Литература

1. Карелина А.О., Ломтева А.Ю., Мозжухина Н.А., Еремин Б.А., Никонов В.А. Методические проблемы мониторинга мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе населенных мест // Гигиена и санитария. 2016. №95 (10). С. 985-988.
2. Горшков Е.В., Насими М.Х. Исследование загрязнения городской воздушной среды мелкодисперсной пылью природного происхождения // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3896/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3896/).
3. Волкодаева М.В., Киселев А.В. О развитии системы экологического мониторинга атмосферного воздуха // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 589-596.
4. Холодов А.С., Кириченко А.Ю., Задорнов К.С., Голохваст К.С. Влияние твердых взвешенных частиц атмосферного воздуха населенных пунктов на здоровье человека // Вестник КамчатГТУ. 2019. №49. С. 81-88.
5. Kumar P., Morawska L., Martani C., Biskos G., Neophytou M.K.-A., Di Sabatino S., Bell M., Norford L., Britter R. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities // Environment International. 2015. V. 75. pp. 199–205.

6. Piedrahita R., Xiang Y., Masson N., Ortega J., Collier A., Jiang Y., Li K., Dick R.P., Lv Q., Hannigan M., et al. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring // Atmospheric Measurement Techniques. 2014. V. 7. pp. 3325–3336.
7. Karagulian F., Barbieri M., Kotsev A., Spinelle L., Gerboles M., Lagler F., Redon N., Crunaire S., Borowiak A. Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring // Atmosphere MDPI. 2019. - URL: [researchgate.net/publication/335466076](https://researchgate.net/publication/335466076).
8. Сергина Н.М., Николенко Д.А., Брызгина Е.О., Сущенко Р.В., Азарова М.Д. Исследования загрязнения мелкодисперсной пылью воздушной среды на территории парковых зон, соседствующих с автомагистралями // Инженерный вестник Дона. - 2023. - № 9. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8669](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8669).
9. Сергина Н.М., Соломахина Л.Я., Лазуренко К.И., Соломахин М.С. О загрязнении атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге взвешенными веществами // Инженерный вестник Дона. - 2019. - № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5568](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5568).
10. Азаров В.Н., Иванова Ю.П., Соколова Е.В., Сахарова А.А., Иванова О.О., Арзамаскова Л.М., Коновалов О.В. Особенности мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в линейных и компактных городах на примере Волгограда и Ставрополя // Инженерный вестник Дона. - 2023. - № 8. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8606](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8606).

### References

1. Karelina A.O., Lomteva A.Yu., Mozzhuhina N.A., Eremin B.A., Nikonov V.A. Gigiena i sanitariya. 2016. № 95 (10). pp. 985-988.
  2. Gorshkov E.V., Nasimi M.H. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3896/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3896/).
-



3. Volkodaeva M.V., Kiselev A.V. Zapiski Gornogo instituta. 2017. V. 227. pp. 589-596.
4. Holodov A.S., Kirichenko K.Yu., Zadornov K.S., Golohvast K.S. Vestnik KamchatGTU. 2019. №49. pp. 81-88.
5. Kumar P., Morawska L., Martani C., Biskos G., Neophytou M.K.-A., Di Sabatino S., Bell M., Norford L., Britter R. Environment International. 2015. V. 75. pp. 199–205.
6. Piedrahita R., Xiang Y., Masson N., Ortega J., Collier A., Jiang Y., Li K., Dick R.P., Lv Q., Hannigan M., et al. Atmospheric Measurement Techniques. 2014. V. 7. pp. 3325–3336.
7. Karagulian F., Barbieri M., Kotsev A., Spinelle L., Gerboles M., Lagler F., Redon N., Crunaire S., Borowiak A. Atmosphere MDPI. 2019. URL: [researchgate.net/publication/335466076](https://researchgate.net/publication/335466076).
8. Sergina N.M., Nikolenko D.A., Bryazgina E.O., Sushchenko R.V., Azarova M.D. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8669](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8669).
9. Sergina N.M., Solomakhina L.Ya., Lazurenko K.I., Solomakhin M.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5568](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5568).
10. Azarov V.N., Ivanova Yu.P., Sokolova E.V., Sakharova A.A., Ivanova O.O., Arzamaskova L.M., Konovalov O.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8606](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8606).

**Дата поступления: 1.03.2024**

**Дата публикации: 4.04.2024**