

Научно-методические аспекты организации экологического мониторинга приаэродромных территорий

© 2021. Ж. Ю. Кочетова¹, д. г. н., доцент,
О. В. Базарский¹, д. ф.-м. н., профессор,
Н. В. Маслова², к. х. н., химик-эксперт,
И. С. Лазарев¹, помощник начальника отдела,

¹Военно-воздушная академия имени
профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А,

²Центр гигиены и эпидемиологии № 97,
394009, Россия, г. Воронеж, ул. Ворошилова, д. 22,
e-mail: zk_vva@mail.ru

Предложен новый подход к экологическому мониторингу депонирующих сред приаэродромных территорий, направленный на повышение его точности и информативности при одновременном снижении стоимости. Разработанная схема экологического мониторинга включает: прогноз загрязнения почв анализом-маркером (керосином) на разном удалении от взлётно-посадочной полосы; построение цифровых карт загрязнения почв анализом-маркером по результатам измерений в полевых условиях с применением разработанного мобильного и экономичного пьезосенсорного измерительного устройства; выделение на карте связанных областей с повышенным содержанием анализа-маркера; отбор проб почв в связанных областях и определение в них содержания приоритетных загрязнителей аэродромов (керосин, формальдегид, нитраты, тяжёлые металлы) стандартными лабораторными методами; расчёт уточнённого суммарного показателя загрязнения почв и построение тематических карт с последующим принятием решения о реабилитации экологически неблагоприятных участков. Предложенная схема экологического мониторинга апробирована на прилегающих территориях к аэродромам «Балтимор» и «Энгельс-2».

Ключевые слова: экологический мониторинг, загрязнение почв, керосин, формальдегид, тяжёлые металлы, нитраты, аэродром государственной авиации.

Scientific and methodological aspects of the organization of environmental monitoring of near-aerodrome territories

© 2021. Zh. Yu. Kochetova¹ ORCID: 0000-0001-8838-9548[?]

O. V. Bazarsky¹ ORCID: 0000-0002-0603-5277[?]

N. V. Maslova² ORCID: 0000-0002-0100-9600[?]

I. S. Lazarev¹ ORCID: 0000-0002-7461-1651[?]

¹N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy,
54A, Staryih Bolshevikov St., Voronezh, Russia, 394064,

²Hygiene and Epidemiology No. 97 FMBA of Russia Federal Medical Biological Agency,
22, Voroshilova St., Voronezh, Russia, 394009,

e-mail: zk_vva@mail.ru

A new approach to environmental monitoring of depositing media of near-aerodrome territories is proposed, aimed at increasing its accuracy and information content while reducing the cost. For this purpose, based on the correlation analysis of the results of eleven-year monitoring of the territory adjacent to the airfield of state aviation, the choice of a marker analyte of soil pollution with the main pollutants was justified; a predictive model of soil contamination by a specific pollutant (aviation fuel) as a result of its droplet formation and dispersion during the operation of aircraft engines at afterburner during takeoff and landing has been developed; a piezosensor method has been developed for the rapid determination of a marker analyte in the field; it is shown the need for an accurate calculation of the final score, and the rating scale of the total soil contamination of near-aerodrome territories with the main pollutants is presented to describe the ecological situation. The proposed scheme of geoeological monitoring includes: prediction of soil pollution with an marker analyte (kerosene) at different distances from the runway; construction of pixel maps of soil pollution with an

marker analyte based on the results of measurements in the field using a mobile and economical piezosensor measuring device; allocation of related areas with high content of marker analyte on pixel maps; sampling of soils in the selected associated areas and determination of the content of priority pollutants (kerosene, formaldehyde, nitrates, heavy metals) by standard laboratory methods; calculation of the specified total indicator of soil pollution and construction of thematic maps with subsequent decision-making on the rehabilitation of environmentally unfavorable areas. The proposed scheme of geoeological monitoring was tested in the adjacent territories to the airfields "Baltimore" and "Engels-2".

Keywords: environmental monitoring, soil pollution, kerosene, formaldehyde, heavy metals, nitrates, state aviation airfield.

В России насчитывается около семидесяти активно действующих аэродромов государственной авиации. В основном они построены в военные и послевоенные годы. Естественный и необратимый процесс урбанизации привёл к «поглощению» аэродромов городами. За десятилетия эксплуатации аэродромов на прилегающих к ним территориях сложилась близкая к катастрофической экологическая ситуация, что отмечается в ежегодном докладе МЧС России [1]. Приоритетные загрязнители аэродромов (керосин, формальдегид, тяжёлые металлы, нитраты) – вещества, концентрации которых в почве всегда превышают фоновые концентрации исследуемых территорий, распространяются на значительные расстояния, в том числе на селитебные и рекреационные зоны [2–4]. Загрязнители и продукты их деструкции являются химически опасными веществами (II–IV классов опасности), которые длительное время накапливаются в депонирующих средах. Следовательно, с каждым годом растёт противоречие между выполнением аэродромами государственной авиации стратегических задач по обеспечению национальной безопасности страны и экологическим ущербом, наносимым ими.

Стандартная схема экологического мониторинга депонирующих сред аэродромов и прилегающих территорий включает этапы: отбор проб почвы в местах максимального загрязнения (взлётно-посадочная полоса (ВПП), рулёжные дорожки, места хранения и перекачки топлива) и на детских площадках прилегающих населённых пунктов; транспортировка проб в лаборатории, определение содержания загрязнителей с применением дорогостоящего оборудования; расчёт суммарного показателя загрязнения почв; построение аналоговых карт загрязнения территории и оценка экологической ситуации по усреднённым значениям [5].

В соответствии с ГОСТ Р 53123-2008 «Качество почвы. Отбор проб» число контрольных участков на 1 га исследуемой территории должно быть от одного до пяти (в местах предполагаемого загрязнения). На практике из-за

высокой стоимости лабораторных исследований в последние годы наблюдается тенденция к уменьшению числа участков пробоотбора и периодичности наблюдений, сокращению перечня обязательно контролируемых веществ [6, 7]. Кроме того, рассчитываемый по общепринятой методике суммарный показатель загрязнения депонирующих сред Z_c учитывает только те загрязнители, предельно допустимые концентрации (ПДК) которых превышены. Такой подход не отражает реальную опасность загрязнения территорий, подвергающихся разнообразному техногенному влиянию, и справедливо критикуется во многих работах [8–10].

Цель работы – повышение точности, информативности, эффективности при сокращении стоимости экологического мониторинга депонирующих сред приаэродромных территорий путём разработки новых моделей и методик для описания распространения и накопления основных загрязнителей в поверхностном слое почвы, экспресс-определения аналита-маркера загрязнения приаэродромных территорий с последующим построением цифровых карт и оценкой экологической ситуации.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – процесс загрязнения депонирующих сред приаэродромных территорий приоритетными загрязнителями. Предмет исследования – модели и методики для описания распространения, взаимного влияния, накопления в почве основных загрязнителей; экспресс-определения в почве аналита-маркера загрязнения приаэродромных территорий; оценки экологической ситуации на аэродромах и приаэродромных территориях.

Модели и методики отработаны при проведении экологического мониторинга почв на аэродроме «Балтимор» и прилегающих к нему территориях (г. Воронеж) по стандартной схеме. Отбор проб и их анализ проводили специалисты сертифицированной лаборато-

рии Центра гигиены и эпидемиологии № 97 по стандартным методикам. Четыре раза в год с 2007 по 2017 гг. на контрольных участках на аэродроме (1 – ВПП; 2, 3 – рулёжные дорожки; 4 – склад горюче-смазочных материалов (ГСМ) и прилегающих к нему селитебной и рекреационной зонах (5 – посёлок Первомайский, 6 – дачный посёлок Сады)) определяли в почвах концентрации приоритетных загрязнителей аэродромов – керосина, формальдегида, тяжёлых металлов, нитратов, нитритов. По известному уравнению, широко применяемому на практике для оценки суммарного загрязнения почв [7, 11], рассчитывали суммарный показатель загрязнения деponирующих сред Z_c . По этому показателю в программе Surfer строили изолинии загрязнения территории.

Результаты и обсуждение

Путём корреляционного анализа установлен аналит-маркер загрязнения почв, подвергающихся воздействию от аэродрома, – керосин. Результаты расчётов среднего значения коэффициента корреляции Спирмена R_s по шести участкам пробоотбора за исследуемый период времени приведены в таблице 1.

Высокой теснотой связи характеризуется содержание в почвах керосина и формальдегида, так как они являются специфическими загрязнителями аэродромов [4]. Значимая корреляционная связь концентрации керосина с содержанием в почвах тяжёлых металлов получена для свинца (Pb), марганца (Mn), кадмия (Cd). При этом R_s концентрации керосина в почве и суммарного показателя загрязнения почв тяжёлыми металлами ($Z_c^{мет}$) показывает среднюю или высокую тесноту связи на всех участках пробоотбора. Корреляционная связь концентрации керосина с нитратным азотом (NO_3^-) во многом определяется свойствами исследуемых почв: наибольшая теснота связи проявляется в преобразованных почвах, обеднённых гумусом. Для всех типов почв по мере повышения содержания в них керосина, теснота связи между его концентрацией и концентрациями других приоритетных загрязни-

телей увеличивается. Это объясняется тем, что керосин, накапливаясь в поверхностном слое почв, приводит к изменению их физических и морфологических характеристик, влияет на фильтрацию, трансформацию и поглощение загрязнителей корнями растений.

Оценка правомерности использования керосина в качестве аналита-маркера загрязнения приаэродромных территорий проведена по идентичности изолиний аналоговых карт. При построении карты загрязнения почв приаэродромной территории в г. Воронеже приоритетными загрязнителями для каждого контрольного участка рассчитывали суммарный показатель Z_c .

В соответствии с рангами экологической ситуации, приведёнными в Методических указаниях МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населённых мест», уровень загрязнения почв за 11 лет наблюдений (как на самом аэродроме, так и в жилых зонах) не зависел от интенсивности и дальности источника выбросов и оставался допустимым. Исключение составляет территория склада ГСМ во время масштабной реконструкции с извлечением подземных цистерн для хранения топлива, когда ориентировочно-допустимая концентрация керосина в почве (100 мг/кг) была превышена в 30 раз. Таким образом, общепринятый показатель Z_c отражает загрязнение почв только при развитии чрезвычайных ситуаций и не пригоден для оценки экологической ситуации при эксплуатации аэродромов в штатном режиме.

Для более точной оценки экологической ситуации в работе использовали уточнённый суммарный показатель загрязнения S , который учитывает все приоритетные загрязнители, не зависимо от их фактической концентрации в почвах и поэтому является более точной характеристикой экологической ситуации [8]. За основу ранжирования загрязнения деponирующих сред по уровням экологической опасности взята шкала, приведённая в работе [10]. В соответствии с этой шкалой, экологическая ситуация в ближайших к аэродрому населённых пунктах ухудшилась за 11 лет от

Таблица 1 / Table 1

Теснота связи содержания в почве керосина с концентрациями других приоритетных загрязнителей аэродрома (число проб $n = 132$; уровень значимости $p = 0,01$; критическое значение $R_s = 0,39$)
Correlation of kerosene content in the soil with concentrations of other priority pollutants of the airfield (number of samples $n = 132$; significance level $p = 0.01$; critical value $R_s = 0.39$)

Загрязнитель Pollutant	Pb	Zn	Ni	Cu	Mn	Cd	$Z_c^{мет}$ Z_c^{met}	NO_3^-	Формальдегид Formaldehyde
R_s	0,72	0,31	0,02	0,23	0,45	0,51	0,67	0,42	0,81

Таблица 2 / Table 2

Интегральные показатели загрязнения почв на аэродроме «Балтимор» и прилегающих к нему территориях / Integral indicators of soil pollution at “Baltimore” airfield and surrounding areas

Участок отбора пробы The sampling point	2007 г. (year)		2012 г. (year)		2017 г. (year)		Ранг загрязнения* The rank of pollution*	
	Z _c	S	Z _c	S	Z _c	S	Z _c	S
1 – взлётно-посадочная полоса runway	**	**	4,4	6,9	7,9	9,8	Д AL	КК→НК СС→УС
2 – рулѐжная дорожка taxiway	**	**	2,4	3,0	6,6	8,9		ТФ→НК ТВ→УС
3 – рулѐжная дорожка taxiway	**	**	3,9	5,4	7,6	9,5		КК→НК СС→УС
4 – склад ГСМ / fuel and lubricants warehouse	**	**	7,3	9,3	24,4	25,8	Д→УО AL→МН	НК→Б УС→Д
5 – пос. Первомайский Pervomaysky village	***	-0,5	1,1	2,4	3,5	7,2	Д AL	ПФ→ЭН→КК НВ→ЕН→СС
6 – дачный пос. Сады dacha village Gardens	***	-1,1	1,6	1,9	2,5	6,1		ПФ→ЭН→КК НВ→ЕН→СС

Примечание: *Д – допустимый уровень; УО – умеренно опасный; ПФ – природный фон; ТФ – техногенный фон; Н – экологическая норма; ЭР – экологический риск; КК – компенсированный кризис; НК – некомпенсированный кризис; Б – бедствие; ** – нет данных; *** – невозможно рассчитать Z_c (все K_i < 1).

Note: *AL – acceptable level; МН – moderately hazardous; НВ – natural background; ТВ – technogenic background; EN – ecological norm; ER – environmental risk; CC – compensated crisis; UC – uncompensated crisis; D – disaster; ** – no data; *** – Z_c cannot be calculated (all K_i < 1).

природного фона до компенсированного кризиса, а на территории склада ГСМ ситуация трактуется как бедствие и требует принятия мер по устранению последствий загрязнения.

Сравнительная оценка экологической ситуации на шести участках отбора проб по стандартному и предложенному интегральным показателям загрязнения почв представлена в таблице 2.

Для прогнозирования масштабов и уровня загрязнения приаэродромных территорий анализом-маркером авторами разработана математическая модель образования, рассеивания капель керосина в атмосфере и поверхностного загрязнения им почв [12]. Получено удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных данных (R² = 0,81) при апробации модели на приаэродромных территориях в г. Воронеж и г. Энгельс. Радиус и интенсивность загрязнения почв от авиационной деятельности во многом определяется особенностями эксплуатации аэродрома (время эксплуатации, тип авиационной техники, количество самолётывлетов в год) и может достигать 2,5 км от ВПП. Экологически опасное загрязнение возможно до 100 м от ВПП, а основная масса осаждаемого керосина приходится на участок до 300 м. Наибольшее расхождение между расчётными и экспериментальными данными получены на расстоянии до 50 м от ВПП, что объясняется высокой турбулентностью процессов вблизи ВПП, смывами с покрытия.

На базе Воронежского государственного университета инженерных технологий (научная группа профессора Т.А. Кучменко) разработан пьезосенсорный датчик, позволяющий в полевых условиях без пробоотбора и пробоподготовки с высокой точностью определять концентрацию керосина в почве [13]. Датчик апробирован в лаборатории Федерального медико-биологического агентства (г. Воронеж) и применяется для ранжирования проб почв по уровню загрязнения керосином. Главными его достоинствами являются высокая энерго- и ресурсоэкономичность; мобильность; экспрессность получения аналитической информации в полевых условиях.

Аналит-маркер загрязнения почв приаэродромных территорий, построенная математическая модель образования, рассеивания и загрязнения почв керосином, разработанный датчик для экспресс-определения концентрации керосина в полевых условиях и методика расчёта уточнённого суммарного показателя загрязнения почв позволили создать схему экологического мониторинга приаэродромных территорий, направленную на сокращение расходов на мониторинг при одновременном повышении его точности и информативности.

Схема организации мониторинга апробирована на приаэродромных территориях в г. Воронеж, Энгельс. На первом этапе рассчитывали площадь воздействия аэродромов на прилегающие территории с помощью построенной

математической модели образования и распространения керосина. Территорию делили на пиксели, увеличивающиеся по мере удаления от ВПП с шагом 300, 500 и 900 м; координаты пикселей фиксировали в системе «ГЛОНАСС». В центре каждого пикселя в полевых условиях определяли концентрацию аналита-маркера загрязнения депонирующих сред аэродромов.

По результатам измерений строили цифровую карту загрязнения почв приаэродромной территории керосином, на которой выделяли связанные области: 1) концентрация керосина превышает ПДК более чем в 3 раза (красный цвет); 2) концентрация керосина равна ПДК или незначительно её превышает (жёлтый цвет). В каждой связанной области отбирали пробы (одна проба в первой области и три пробы во второй) и анализировали их в лаборатории по стандартным методикам на содержание керосина, формальдегида, тяжёлых металлов, нитратов и нитритов. По результатам измерений рассчитывали уточнённый суммарный показатель загрязнения депонирующих сред *S* и строили тематическую карту с последующим ранжированием загрязнения почв по уровню опасности.

Заключение

Представленная карта загрязнения почв прилегающих к аэродромам территорий позволила выявить экологически опасные участки (некомпенсированный кризис) в селитебно-транспортной и рекреационной зонах, что невозможно было сделать по стандартной схеме экологического мониторинга. Рассчитанная вероятность правильной классификации рангов загрязнённых участков по представленной схеме мониторинга возрастает примерно в 2 раза. При этом эффективность мониторинга, установленная с учётом стоимости лабораторных и полевых исследований (без учёта заработной платы сотрудников), увеличивается в 3 раза. Информативность экологического мониторинга территории приаэродромных территорий по предложенной схеме зависит от разрешения построенной цифровой карты загрязнения депонирующих сред аналитом-маркером и может быть повышена более, чем в 10 раз в зависимости от требуемой точности исследований.

References

1. Report on the results of 2014 and the main activities of the EMERCOM of Russia for 2015-2018 [Internet resource] <https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/itogideyatelnosti-mchs-rossii/> (Accessed: 07.12.2019).

2. Abegglen M., Brem B.T., Ellenrieder M., Durdina L., Rindlisbacher T., Wang J., Lohmann U., Sierau B. Chemical characterization of freshly emitted particulate matter from aircraft exhaust using single particle mass spectrometry // *Atmospheric Environment*. 2016. V. 134. P. 181–197. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.051

3. Rao P., Zhu A., Yao W., Zhang W., Men Yo., Ding G. Sources and risk assessment of metal contamination in soils at the international airport of Shanghai, China // *Toxicological and Environmental Chemistry*. 2014. V. 96. No. 8. P. 1153–1161. doi: 10.1080/02772248.2015.1019885

4. Qu M., Lu J., He R. Formaldehyde from environment // *Formaldehyde from Environment*. Springer, Dordrecht. 2017. P. 1–19. doi: 10.1007/978-94-024-1177-5_1

5. Nikolaykina N.E., Nikolaykin N.I., Matyagina A.M. Industrial ecology: Engineering protection of the biosphere from the effects of air transport. Moskva: Akademkniga, 2006. 239 p. (in Russian).

6. The water strategy of the Russian Federation for the period up to 2020 and the action plan for its implementation [Internet resource] <http://docs.cntd.ru/document/902173350/> (Accessed: 07.12.2019).

7. Kochetova Zh.Yu., Bazarskiy O.V., Maslova N.V. Comparative analysis of integral indicators of soil contamination of urbanized territories by priority contaminants // *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. No. 1 (125). P. 28–37 (in Russian).

8. Cagatay S., Mihci H. Industrial pollution, environmental suffering and policy measures: an index of environmental sensitivity performance (IESP) // *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*. 2003. V. 05. No. 2. P. 205–245. doi: 10.1142/S1464333203001309

9. Zanella A., Camanho A.S., Dias T.G. Benchmarking countries' environmental performance // *Journal of the Operational Research Society*. 2013. V. 64. No. 3. P. 426–438. doi: 10.1057/jors.2012.62

10. Trofimov V.T., Ziling D.G. Engineering geology and ecological ecology: theoretical and methodological foundations and relationship. Moskva: Izd-vo Mosk. un-ta, 1999. 119 p. (in Russian).

11. Dorokhova M.F., Kosheleva N.E., Terskaya E.V. Ecological state of urban soils under conditions of anthropogenic salinization and pollution (on the example of the North-Western District of Moscow) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 4. P. 16–24 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-016-024

12. Bazarskiy O.V., Kochetova Zh.Yu. Model of evaporation of kerosene droplets in the atmosphere and soil pollution near the aerodrome territory // *Vestnik MGTU*. 2019. No. 1. P. 64–71 (in Russian). doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-64-71

13. Kochetova Zh.Yu., Bazarskiy O.V., Kuchmenko T.A. Rapid assessment of soil pollution with kerosene using a carbon-nanotube-based piezosensor // *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2017. V. 72. No. 1. P. 63–68 (in Russian). doi: 10.3103/S0027131417010084