

УДК 504.064.2

Развернутый химический анализ почв и установление приоритетных загрязнителей на территории аэродрома государственной авиации (г. Крымск)

Ж. Ю. Кочетова*, И. С. Лазарев, Н. В. Зиброва, О. В. Базарский

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", г. Воронеж, Россия;
e-mail: zk_vva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
25.08.2023;

получена
после доработки
27.10.2023;

принята
к публикации
30.10.2023

Ключевые слова:

загрязнение почв,
военный аэродром,
фоновые концентрации
металлов,
класс опасности,
приоритетные
загрязнители,
кларки

Экологические проблемы на масштабных территориях (полигоны различного назначения, военные базы, аэродромы) обострились в связи с интенсификацией военной деятельности. Создание перечней приоритетных загрязнителей объектов окружающей среды, обязательных для контроля на таких территориях, является первоочередной задачей. В статье приводятся данные развернутого геохимического анализа почв территории аэродрома государственной авиации, на основании которого выявлены приоритетные контаминанты с учетом их валового содержания, классов опасности и повторяемости превышения опасных концентраций относительно фона. В Краснодарском крае (г. Крымск) за 4 года исследований проанализировано 32 пробы с территории аэродрома государственной авиации, а также установлены фоновые концентрации 22 металлов, нефтепродуктов, формальдегида и нитратного азота. Для определения классов опасности металлов с неустановленными предельно допустимыми концентрациями проведен корреляционный анализ, сопоставляющий классы опасности веществ и их кларки. По результатам исследования составлен рекомендуемый к контролю список загрязнителей, в который входят цезий, мышьяк, скандий, ниобий, свинец (I класс опасности); сурьма, формальдегид, нитратный азот (II); нефтепродукты (III). Вариабельность распределения концентраций загрязнителей на территории аэродрома зависит от особенности эксплуатации воздушных судов и специальной техники для обеспечения полетов. Во всех точках пробоотбора (начало – конец и периметр взлетно-посадочной полосы; рулежные дорожки; под глиссадой) головным загрязнителем почв является мышьяк, концентрации которого превышают фоновые в 16–36 раз. Установлено опасно высокое содержание в почвах аэродрома нефтепродуктов, формальдегида, нитратного азота, в некоторых точках – скандия и цезия.

Для цитирования

Кочетова Ж. Ю. и др. Развернутый химический анализ почв и установление приоритетных загрязнителей на территории аэродрома государственной авиации (г. Крымск). Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-83-90>.

Detailed chemical analysis of soils and identification of priority pollutants on the territory of the state aviation airfield (Krymsk)

Zhanna Yu. Kochetova*, Il'ya S. Lazarev, Nadezhda V. Zibrova, Oleg V. Bazarsky

*Military Educational and Scientific Center Air Force

"N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russia;
e-mail: zk_vva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>

Article info

Received
25.08.2023;

received
in revised form
27.10.2023;

accepted
30.10.2023

Key words:

soil pollution,
military airfield,
background
concentrations of metals,
hazard class,
priority pollutants,
clarks

Abstract

In connection with the intensification of military activities, environmental problems have worsened in large-scale territories. The primary task is to create lists of priority pollutants of environmental objects that are mandatory for control at landfills for various purposes, military bases, airfields. The paper presents the data of a detailed geochemical analysis of the soils of the state aviation airfield territory, on the basis of which priority contaminants were identified taking into account their gross content, hazard classes and the frequency of exceeding dangerous concentrations relative to the background. In the Krasnodar Territory (Krymsk), 32 samples from the territory of the state aviation airfield were analyzed over 4 years of research, and background concentrations of 22 metals, petroleum products, formaldehyde and nitrate nitrogen were also established. To determine the hazard classes of metals with unspecified maximum permissible concentrations, a correlation analysis was carried out comparing the hazard classes of substances and their clarks. Based on the results of the study, a list of pollutants recommended for control has been compiled including cesium, arsenic, scandium, niobium, lead (hazard class I); antimony, formaldehyde, nitrate nitrogen (II); petroleum products (III). The variability of the distribution of concentrations of pollutants on the airfield territory depends on the specifics of the operation of aircraft and special equipment for flight support. But at all sampling points (beginning – end, runway perimeter; taxiways; under the glide path), the main soil pollutant is arsenic, which concentrations exceed background concentrations by 16–36 times. The dangerously high content of petroleum products, formaldehyde, nitrate nitrogen, and scandium and caesium in some points in the airfield soils has been also found.

For citation

Kochetova, Zh. Yu. et al. 2024. Detailed chemical analysis of soils and identification of priority pollutants on the territory of the state aviation airfield (Krymsk). *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 83–90. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-83-90>.

Введение

Экологические проблемы, вызванные военной деятельностью, с каждым годом приобретают все большую актуальность. Это связано с ростом политической напряженности в мире, увеличением числа военных конфликтов и, как следствие, с активизацией эксплуатации существующих военных объектов и строительством новых, разработкой и испытанием различных видов техники, оружия, боеприпасов. Площадь территорий, принадлежащих военным ведомствам, по разным данным оценивается в 750–1,5 млн км². Во многих случаях это лесные массивы, плодородные земли, пастбища, изъятие которых из сферы промышленного и сельскохозяйственного производства негативно сказывается на общем экономическом потенциале государства и жизненном уровне населения (Кочетова и др., 2023). Экологическая ситуация на объектах военной деятельности и территориях ведения вооруженных конфликтов во всем мире близка к катастрофической. Наибольшей техногенной трансформации (по масштабам, глубине и необратимости) подвергается литосфера (Трофимов и др., 2019). Нарушение рельефа, химическое загрязнение почв и подземных вод сохраняется на высоком уровне даже через десятилетия после консервации военных баз, полигонов, аэродромов, складов с оружием и боеприпасами (Кочетова, 2019; Харькина, 2004; Hussain et al., 2008).

В западных странах (США, Канада, ЕС) с 1990-х годов составляются реестры деградации земель, относящихся к военным ведомствам или выкупленных частными лицами для строительства жилых комплексов, парков и для других гражданских нужд (Кочетова и др., 2023). Целью таких масштабных и дорогостоящих исследований является оценка экологического ущерба и разработка эффективных комплексных мероприятий по реабилитации почв. Надо отметить, что сравнение нескольких десятков отчетов о проведении этих работ показали отсутствие единой методики для интегральной оценки загрязнения почв и подземных вод даже в пределах одного штата или страны. К настоящему времени так и не определен перечень обязательных к контролю загрязняющих веществ почв объектов военной деятельности различного назначения. В разных работах для идентичных полигонов и аэродромов исследуют содержание в почвах от 2 до 6 металлов, причем без обоснования выбора именно этих элементов. В основном к ним относятся свинец и медь, реже кадмий, никель, цинк, барий, ртуть, марганец, олово, ванадий, мышьяк, хром. Нормативы содержания токсикантов в почвах могут отличаться на несколько порядков в пределах одной страны, при этом применяются различные методики оценки суммарного загрязнения почв, часто не имеющие научного обоснования (Tomic et al., 2018; Okkenhaug et al., 2016; Tandy et al., 2017; Knechtenhofer et al., 2003; Lafond et al., 2014; Bausinger et al., 2007; Meerschman et al., 2011).

Этой проблеме начинают уделять внимание в нашей стране (Смурыгин и др., 2019). В открытых источниках приводятся разрозненные данные о загрязнении почв аэродромов и аэропортов металлами (в основном, свинцом, кадмием, цинком, медью, никелем, хромом), нефтепродуктами, нитратным азотом, формальдегидом (Базарский и др., 2019; Геворгян и др., 2013; Кочетова, 2019; Kochetova et al., 2018). По мнению многих специалистов, к недостаткам существующей в России стандартной методики интегральной оценки загрязнения почв относятся: отсутствие нормативов для многих металлов с доказанной опасностью для окружающей среды и человека; необъективность расчета суммарного показателя загрязнения почв относительно только предельно допустимых или только фоновых концентраций токсикантов в почвах; отсутствие подхода к выбору приоритетных загрязнителей почв и, как следствие, необъективность оценки экологической ситуации¹ (Дабахов и др., 2005; Экологическое..., 2013).

Цель работы – установление приоритетных загрязнителей почв аэродромов с учетом класса опасности токсикантов, их валового содержания и повторяемости превышения фактической концентрации нормативов, апробация предложенного подхода на аэродроме государственной авиации и прилегающей к нему рекреационной зоне. Для достижения цели проведен многолетний мониторинг загрязнения почв в г. Крымск (Краснодарский край); проанализированы данные развернутого геохимического анализа почв на аэродроме и в прилегающем к нему поселке (под глиссадой); установлены фоновые концентрации загрязнителей в почвах; с учетом кларка определены классы опасности токсикантов с неустановленными предельно (ориентировочно) допустимыми концентрациями (П(О)ДК); рассчитаны коэффициенты концентрации элементов с учетом их валового содержания в почвах и токсичности.

Материалы и методы

Объект исследования – загрязнение почв металлами, мышьяком, нефтепродуктами, нитратным азотом и формальдегидом на территории аэродрома государственной авиации и прилегающей к нему

¹ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. 635 с.

территории в г. Крымск. Характерной особенностью преобладающих на исследуемых территориях луговых почв является мощный перегнойный слой (до 100 см) темно-серого цвета с прочной зерновой структурой. Луговая почва по гранулометрическому составу тяжелосуглинистая. Содержание гумуса – 3,2–3,8 %, реакция почвенного раствора – слабокислая.

Пробы почв глубиной до 10 см отбирали методом конверта со сторонами 10 м в период с 2019 по 2022 гг. 4 раза в год в восьми точках с потенциально опасным содержанием загрязнителей. К таким участкам относятся: начало и конец взлетно-посадочной полосы (ВПП); перпендикулярное направление от ВПП на расстоянии 5–10 м; рулежные дорожки; под глиссадой на расстоянии 800 м от начала ВПП. Для установления фоновых концентраций загрязняющих веществ ($C_{\text{фон}}$) исследовали пробы такого же типа почв на расстоянии ~11 км от аэродрома.

Анализ проб проводили в аттестованной лаборатории комплексных исследований Научно-исследовательского института геологии на базе Воронежского государственного университета. Металлы и мышьяк в почве определяли методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФА S8 TIGER, Bruker, Германия); нитратный азот – потенциметрически, нефтепродукты – гравиметрическим методом, формальдегид – фотометрическим методом с хромотроповой кислотой. Результаты исследований приведены на абсолютно сухую пробу. Погрешность определений соответствует нормам погрешности при определении химического минерального состава сырья по III категории точности в соответствии с ОСТ 41-08-212-04².

Для определения класса опасности металлов (с неустановленным П(О)ДК) рассчитывали ранговый коэффициент корреляции Спирмена K_s (Гмурман, 2004). Теснота связи между средним содержанием исследуемых элементов в земной коре (кларк Q , мг/кг) и известными классами опасности веществ характеризуется как высокая ($K_s = 0,85$ при уровне значимости 0,05). Это позволяет прогнозировать класс опасности металлов на основании их кларков с высокой надежностью (Виноградов, 1962; Касимов и др., 2015). Надо отметить, что такой высокий коэффициент корреляции возможно получить только в том случае, если цинк отнести ко II классу опасности, а не к I, как принято на сегодняшний день в нормативных документах³. Отметим, что в большинстве западных стран цинк относят ко II классу опасности (Кочетова и др., 2023).

При расчете повторяемости повышенного содержания загрязнителей в почвах P учитывали те вещества, фактические концентрации которых наиболее часто превышают фоновые концентрации в 2 и более раз. Это значение при $n \leq 14$ следует из общепринятого выражения для расчета суммарного показателя загрязнения почв Z_c ⁴

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{факт}i}}{C_{\text{фон}i}} - (n-1), \quad (1)$$

где $C_{\text{факт}i}$ и $C_{\text{фон}i}$ – фактическая и фоновая концентрация i -го загрязнителя; $C_{\text{факт}i} / C_{\text{фон}i} = K_{ki}$ – коэффициент концентрации i -го загрязнителя; n – количество учитываемых загрязнителей с $K_{ki} \geq 1$.

При $Z_c < 16$ категория загрязнения почв считается допустимой (наиболее низкий уровень заболеваемости детей и минимум функциональных отклонений). В соответствии с известной методикой⁵ повторяемость загрязнения среды i -м компонентом считали устойчивой при $P_i \geq 30$ %, характерной – при $P_i \geq 50$ %.

Результаты и обсуждение

Предельно (ориентировочно) допустимые концентрации и кларки исследуемых загрязнителей представлены в табл. 1⁶ (Виноградов, 1962; Касимов, 2015). Металлы в таблице расположены по мере возрастания их кларков, жирным шрифтом выделены установленные методом подбора классы опасности элементов с неизвестным на сегодняшний день П(О)ДК, при этом K_s для всей выборки составляет 0,95. Фоновые концентрации загрязнителей за исследуемый период времени изменялись незначительно, их средние значения с относительным отклонением не более ± 15 % также представлены в табл. 1.

² Стандарт отрасли. Управление качеством аналитических работ. Нормы погрешности при определении химического состава минерального сырья и классификация методик лабораторного анализа по точности результатов. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293733/4293733706.pdf?ysclid=lrqkrb6g8514543684>.

³ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. 635 с.

⁴ Там же.

⁵ РД 52.24.643. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов н/Д. : Росгидромет, 2002. 55 с.

⁶ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. 635 с.

Повторяемость превышения фоновых концентраций загрязнителей в 2 раза и среднее соотношение $C_{\text{факт}}/C_{\text{фон}}$ в восьми точках контроля за исследуемый период представлены в табл. 2.

Таблица 1. Некоторые характеристики исследуемых загрязнителей почв
Table 1. Some characteristics of the studied soil pollutants

Загрязнитель	$C_{\text{фон}}$, мг/кг	П(О)ДК, мг/кг	Q , мг/кг	Класс опасности	Загрязнитель	$C_{\text{фон}}$, мг/кг	П(О)ДК, мг/кг	Q , мг/кг	Класс опасности
Олово (Sn)	0,28	–	3,5	1	Хром (Cr)	84,2	100	92	2
Цезий (Cs)	3,8	–	5,5	1	Ванадий (V)	58,4	150	121	3
Мышьяк (As)	0,22	10	5,6	1	Цирконий (Zr)	93,2	–	200	3
Скандий (Sc)	1,7	–	6,0	1	Стронций (Sr)	58,4	–	270	3
Ниобий (Nb)	2,9	–	10	1	Рубидий (Rb)	52,0	–	300	3
Галлий (Ga)	8,7	–	15	1	Барий (Ba)	396	–	510	3
Свинец (Pb)	10,2	130	17	1	Марганец (Mn)	644	1 500	710	3
Кобальт (Co)	6,7	5,0	17	2	Титан (Ti)	2 117	–	3 900	4
Сурьма (Sb)	0,48	4,5	18	2	Железо (Fe)	30 114	–	40 600	4
Иттрий (Y)	23,9	–	28	2	Формальдегид	1,8	7,0	–	2
Медь (Cu)	26,7	132	39	2	Нитраты (NO_3^-)	3,4	130	–	2
Никель (Ni)	22,8	80	50	2	Нефтепродукты	38,6	100*	–	3
Цинк (Zn)	39,3	220	75	1(2)					

Примечание. * ПДК нефтепродуктов, установленная по наиболее значимым критериям вредности (Рубин и др., 2013).

Таблица 2. Результаты исследования загрязнения почв аэродрома и приаэродромной территории
Table 2. Results of the study of soil pollution of the airfield and the aerodrome territory

Загрязнитель	Sn	Cs	As	Sc	Nb	Ga	Pb	Co	Sb	Y	Cu	Ni	Zn
P , %	16	100	100	31	77	0	54	16	54	0	25	21	27
K_{ki}	2,6	5,3	27	6,2	4,2	1,7	4,0	1,7	4,2	1,1	2,1	1,8	2,8
Загрязнитель	Cr	V	Zr	Sr	Rb	Ba	Mn	Ti	Fe	ФА	NO_3^-	НП	–
P , %	0	0	13	9	19	16	0	27	0	100	100	100	–
K_{ki}	1,8	1,7	2,2	2,1	2,7	2,9	1,2	3,7	1,6	8,9	7,6	19	–

Примечание. Выделены загрязнители с устойчивой и характерной повторяемостью превышения фоновых концентраций в 4 раза.

Наиболее часто встречающиеся превышения опасного уровня загрязнения почв на аэродроме государственной авиации характерны для элементов I класса опасности – цезия, мышьяка, скандия, ниобия и свинца; II класса опасности – сурьмы, формальдегида и нитратного азота. Нефтепродукты, относящиеся к III классу опасности, содержатся в каждой исследуемой пробе, причем их содержание в почвах, отобранных в начале и конце ВПП, а также под глиссадой достигает 11 ПДК. Таким образом, развернутый химический анализ почв показал, что в установленный ранее перечень обязательных к контролю соединений в почвах аэродромов (Геворгян, 2013; Голубев, 2007; Кочетова, 2019), необходимо включить такие элементы, как цезий, скандий, ниобий, сурьма.

Повышенное содержание цезия на территориях аэродромов государственной авиации возможно объяснить тем, что этот металл применяют в составе присадок к топливу для уменьшения радиолокационной заметности шлейфов выхлопных газов; карбонат цезия добавляют в стекло для повышения стабильности и долговечности волоконной оптики и приборов ночного видения. Скандий широко используется для получения прочных, жаростойких и легких алюминий-скандиевых сплавов, применяемых в самолетостроении; компонентов микроэлектроники и флуоресцирующих красок для разметки ВПП; для производства осветительных приборов высокой интенсивности, используемых на аэродромах. Из чистого ниобия или его сплавов изготавливают детали летательных аппаратов. Сурьма все больше применяется в полупроводниковой промышленности при производстве диодов и инфракрасных детекторов, а также в качестве присадки к смазочным материалам подшипников скольжения.

Ниже перечислены убывающие по кратности фону ряды приоритетных загрязнителей в разных точках пробоотбора почв на аэродроме и суммарные показатели загрязнения почв (1):

- начало и конец ВПП: $\text{НП}_{29} > \text{As}_{23} > \text{ФА}_{22} > \text{Cs}_{6,6} > \text{Sb}_{6,3} > (\text{NO}_3^-)_{5,3} > \text{Nb}_{4,8} > \text{Pb}_{2,7} > \text{Sc}_{\text{H/O}}$; $Z_c = 93$;
 перпендикулярно ВПП: $\text{As}_{16} > \text{НП}_{14} > \text{Pb}_{5,0} > \text{ФА}_{4,4} > (\text{NO}_3^-)_{4,3} > \text{Cs}_{3,4} > \text{Sb}_{2,2} > \text{Nb}_{2,4} > \text{Sc}_{\text{H/O}}$; $Z_c = 45$;
 рулежные дорожки: $\text{As}_{36} > \text{НП}_{21} > (\text{NO}_3^-)_{11} > \text{Cs}_{7,1} > \text{Nb}_{4,7} > \text{Pb}_{4,2} > \text{ФА}_{2,8} > \text{Sb}_{2,1} > \text{Sc}_{\text{H/O}}$; $Z_c = 85$;
 под глиссадой: $\text{As}_{32} > \text{НП}_{9,8} > (\text{NO}_3^-)_{9,7} > \text{Sc}_{7,6} > \text{ФА}_{6,3} > \text{Sb}_{6,0} > \text{Nb}_{4,8} > \text{Pb}_{3,6} > \text{Cs}_{2,8}$; $Z_c = 75$.

Основными загрязнителями территории аэродрома в г. Крымск во всех точках пробоотбора являются мышьяк и нефтепродукты. Суммарный уровень загрязнения проб почв характеризуется как "опасный" ($Z_c = 32 - 128$). Если оценивать уровень загрязнения почв индивидуальными неорганическими веществами с учетом их класса опасности, то почвы классифицируются как слабозагрязненные (концентрация мышьяка – элемента первого класса опасности – не превышает или равна 1 ПДК⁷). По нефтепродуктам почвы считаются сильно загрязненными, так как их концентрация превышает 5 ПДК⁷. Высокие значения Z_c получены и за счет введения цезия и скандия в перечень контролируемых соединений, которые ранее никогда не учитывались при оценке экологической ситуации на территориях аэродромов и аэропортов. Обычно считается, что штатный режим эксплуатации аэродромов влияет на загрязнение почв на допустимом уровне (*Лазарев и др., 2022*).

Вариабельность концентраций загрязняющих веществ в точках пробоотбора обусловлена, прежде всего, особенностью эксплуатации летательных аппаратов и средств авиационно-технического обеспечения полетов. Так, наибольшее количество загрязнителей (в том числе формальдегида, несгоревшего топлива и металлосодержащих присадок, входящих в его состав) выбрасывается в атмосферный воздух и осажается на поверхность почв в радиусе до нескольких километров от ВПП при работе двигателя самолета в форсажном режиме (при взлете – посадке). Этим объясняется высокое содержание загрязнителей в почвах в начале и конце ВПП и под глиссадой на расстоянии 800 м от ВПП.

При расчете суммарного показателя загрязнения почв относительно фоновых концентраций (1) не учитываются классы опасности элементов. Содержание в почвах головных компонентов – мышьяка и нефтепродуктов – оценивается как эквивалентное по токсичности воздействия на окружающую среду. За счет того что нефтепродукты на подобных объектах исследования всегда превышают концентрации остальных загрязнителей в десятки раз, происходит "разбавление" высокотоксичных соединений менее опасными, при этом суммарная оценка загрязнения почв занижена и не является объективной.

Для устранения этого недостатка использована стандартная методика определения комплексного индекса загрязнения атмосферы⁸. Единичный индекс загрязнения для i -го вещества рассчитывается по формуле

$$\left(\frac{C_{\text{факт}i}}{C_{\text{фон}i}}\right)^q = (K_{Ki})^q, \quad (2)$$

где $q = 1,5; 1,3; 1,0$ – показатели степени для элементов I, II, III класса опасности соответственно, используемые для приведения всех классов к изоэффективной концентрации веществ III класса опасности.

Тогда с учетом валового содержания и токсичности ряды приоритетных загрязнителей почв аэродрома имеют вид:

начало и конец ВПП: $As_{110} > \Phi A_{66} > \text{НП}_{29} > Cs_{17} > Sb_{11} > Nb_{11} > (NO_3)^-_{8,7} > Pb_{4,4} > Sc_{\text{H/O}}$; $Z_{c^*} = 250$;
перпендикулярно ВПП: $As_{64} > \text{НП}_{14} > Pb_{11} > \Phi A_{6,9} > (NO_3)^-_{6,7} > Cs_{6,3} > Nb_{3,7} > Sb_{2,8} > Sc_{\text{H/O}}$; $Z_{c^*} = 108$;
рулежные дорожки: $As_{216} > (NO_3)^-_{23} > \text{НП}_{21} > Cs_{19} > Nb_{10} > Pb_{8,6} > \Phi A_{3,8} > Sb_{2,6} > Sc_{\text{H/O}}$; $Z_{c^*} = 297$;
под глиссадой: $As_{181} > Sc_{21} > (NO_3)^-_{19} > \text{НП}_{9,8} > Nb_{11} > \Phi A_{11} > Sb_{10} > Pb_{6,8} > Cs_{4,7}$; $Z_{c^*} = 266$.

В этом случае наиболее опасными загрязнителями почв аэродромов выступают мышьяк, нитратный азот, скандий, формальдегид, нефтепродукты. Опасная экологическая ситуация по величине интегрального показателя загрязнения почв Z_{c^*} , полученного суммированием $(K_{Ki})^q$, складывается в зоне рулежных дорожек и под глиссадой.

Заключение

Общепринятый перечень металлов, контролируемых на территориях авиационных комплексов (мышьяк, свинец, медь, никель, цинк, марганец и др.), необходимо дополнить такими элементами, как цезий, скандий, ниобий, сурьма. Развернутый химический анализ почв показал их устойчивое и характерно высокое содержание в почвах как на территории аэродрома, так и под глиссадой в рекреационной зоне. Во всех точках пробоотбора концентрации этих элементов за четырехлетний период наблюдения превышали фоновые в 4 и более раз. Проведенный корреляционный анализ между классами опасности металлов и их кларками позволил отнести цезий, скандий, ниобий к элементам I класса опасности, сурьму – ко II классу.

Максимальное загрязнение почв аэродрома в г. Крымск характерно для зон взлетно-посадочной полосы и рулежных дорожек, что согласуется с ранее проведенными исследованиями. Во всех точках пробоотбора установлено преобладающее содержание мышьяка и нефтепродуктов; в почвах под

⁷ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. 635 с.

⁸ РД 52.04.667-2005. Руководящий документ. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. М. : Метеоагентство Росгидромета, 2006. 60 с.

траекторией взлета – посадки самолетов отмечается также характерное повышение содержания продуктов неполного сгорания топлива (нитратного азота, формальдегида).

Наиболее опасными соединениями с точки зрения их валового содержания в почвах и токсичности являются мышьяк, нитратный азот, формальдегид и скандий. Это необходимо учитывать при проведении экологического мониторинга на аэродромах государственной авиации и прилегающих к ним территориях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Базарский О. В., Кочетова Ж. Ю. Модель испарения капель керосина в атмосфере и загрязнение грунтов приаэродромной территории // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 1. С. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-64-71>. EDN: GISEOE.
- Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571. EDN: SIZCQF.
- Геворгян В. М., Пономарева О. И., Кемер О. В. Экологические особенности почвенного покрова аэродромных комплексов гражданской авиации // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 4(4). С. 795–798. EDN: RGZYRP.
- Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. 479 с.
- Голубев С. В. Загрязнение почв округа Домодедово тяжелыми металлами: дис. ... канд. геогр. наук: 03.00.27. М., 2007. 128 с.
- Дабахов М. В., Дабахова Е. В., Титова В. И. Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования. Н. Новгород: Нижегород. ГСХА, 2005. 165 с.
- Касимов Н. С., Власов Д. В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 2. С. 7–17. EDN: UCGNHL.
- Кочетова Ж. Ю. Авиационно-ракетный кластер как новый класс объектов геоэкологического мониторинга // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 79–91. DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-3-79-91>. EDN: DGBOBJ.
- Кочетова Ж. Ю., Базарский О. В., Пантелеев Д. А. Экология почв военных полигонов. Воронеж: Научная книга, 2023. 184 с.
- Лазарев И. С., Кочетова Ж. Ю., Маслова Н. В., Терентьев В. В. Интегральная оценка загрязнения почв при реконструкции аэродрома // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46, № 3. С. 448–462. DOI: <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-448-462>. EDN: XABGQV.
- Рубин В. М., Ильюкова И. И., Кремко Л. М., Присмотров Ю. А. [и др.]. Гигиеническое обоснование нормативов ПДК нефтепродуктов в почвах Республики Беларусь // Гигиена и санитария. 2013. № 92(2). С. 99–101. EDN: PZMPQB.
- Смурыгин А. В., Бакин Э. Н., Асеев В. А. Особенности экологического обеспечения в Вооруженных силах Российской Федерации // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1(10). С. 393–395. EDN: PKLSBQ.
- Трофимов В. Т., Харьковина М. А., Жигалин А. Д., Барабошкина Т. А. Техногенная трансформация экологических функций абиотических сфер Земли под влиянием военной деятельности // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2019. № 1. С. 3–13. EDN: XUPFWG.
- Харьковина М. А. Экологические последствия военных действий // Энергия: экономика, техника, экология. 2004. № 7. С. 56–59. EDN: OWWJQV.
- Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель / под общ. ред. С. А. Шобы, А. С. Яковлева, Н. Г. Рыбальского. М.: НИИ-Природа, 2013. 309 с.
- Bausinger T., Bonnaire E., Preuss J. Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun // Science of the Total Environment. 2007. Vol. 382, Iss. 1–2. P. 259–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.029>.
- Hussain T., Gondal M. A. Monitoring and assessment of toxic metals in Gulf War oil spill contaminated soil using laser-induced breakdown spectroscopy // Environmental Monitoring and Assessment. 2008. Vol. 136. P. 391–399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9694-2>.
- Knechtenhofer L. A., Xifra I. O., Scheinost A. C., Flühler H. [et al.]. Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: Small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2003. Vol. 166, Iss. 1. P. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200390017>.
- Kochetova Z. Yu., Bazarskii O. V., Maslova N. V. Filtration of heavy metals in soils with different degrees of urbanization and technogenic load // Russian Journal of General Chemistry. 2018. Vol. 88, Iss. 13. P. 2990–2996. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1070363218130261>. EDN: NKOHNE.

- Lafond S., Blais J. F., Mercier G., Martel R. A counter-current acid leaching process for the remediation of contaminated soils from a small-arms shooting range // *Soil and Sediment Contamination*. 2014. Vol. 23, Iss. 2. P. 194–210. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2014.808171>.
- Meerschman E., Cockx L., Islam M. M., Meeuws F. [et al.]. Geostatistical assessment of the impact of World War I on the spatial occurrence of soil heavy metals // *Ambio*. 2011. Vol. 40. P. 417–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0104-6>.
- Okkenhaug G., Gebhardt K.-A. G., Amstaetter K., Bue H. L. [et al.]. Antimony (Sb) and lead (Pb) in contaminated shooting range soils: Sb and Pb mobility and immobilization by iron based sorbents, a field study // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. Vol. 307. P. 336–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.005>.
- Tandy S., Meier N., Schulin R. Use of soil amendments to immobilize antimony and lead in moderately contaminated shooting range soils // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 324, Part B. P. 617–625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.034>.
- Tomić N. T., Smiljanić S., Jović M., Gligorić M. [et al.]. Examining the effects of the destroying ammunition, mines, and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit: Part 1 – pseudo-total concentration // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2018. Vol. 229. Article number: 301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3957-0>.

References

- Bazarskij, O. V., Kochetova, Zh. Yu. 2019. Model of evaporation of kerosene droplets in the atmosphere and soil pollution of the aerodrome territory. *Vestnik of MSTU*, 22(1), pp. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-64-71>. EDN: GISEOE. (In Russ.)
- Vinogradov, A. P. 1962. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geochemistry International*, 7, pp. 555–571. EDN: SIZCQF. (In Russ.)
- Gevorgyan, V. M., Ponomareva, O. I., Kemer, O. V. 2013. Ecological features of the soil cover of aerodrome complexes of civil aviation. *Izvestia RAS SamSC*, 15(4–4), pp. 795–798. EDN: RGZYRP. (In Russ.)
- Gmurman, V. E. 2004. Probability theory and mathematical statistics. Moscow. (In Russ.)
- Golubev, S. V. 2007. Soil pollution of the Domodedovo district with heavy metals. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)
- Dabakhov, M. V., Dabakhova, E. V., Titova, V. I. 2005. Heavy metals: Ecotoxicology and problems of rationing. N. Novgorod. (In Russ.)
- Kasimov, N. S., Vlasov, D. V. 2015. Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry. *Lomonosov Geography Journal*, 2, pp. 7–17. EDN: UCGNHL. (In Russ.)
- Kochetova, Zh. Yu. 2019. Aviation-rocket cluster as a new class of objects of geocological monitoring. *Geographical Bulletin*, 3(50), pp. 79–91. DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-3-79-91>. EDN: DGBOBJ. (In Russ.)
- Kochetova, Zh. Yu., Bazarskij, O. V., Panteleev, D. A. 2023. Soil ecology of military ranges. Voronezh. (In Russ.)
- Lazarev, I. S., Kochetova, Zh. Yu., Maslova, N. V., Terent'ev, V. V. 2022. Integral assessment of soil pollution during airfield reconstruction. *Regional Geosystems*, 46(3), pp. 448–462. DOI: <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-448-462>. EDN: XABGQV. (In Russ.)
- Rubin, V. M., Il'yukova, I. I., Kremko, L. M. et al. 2013. Hygienic justification of the MPC standards of petroleum products in the soils of the Republic of Belarus. *Hygiene and Sanitation, Russian Journal*, 92(2), pp. 99–101. EDN: PZMPQB. (In Russ.)
- Smurygin, A. V., Bakin, E. N., Aseev, V. A. 2019. Features of environmental support in the Armed Forces of the Russian Federation. *Pozharnaya Bezopasnost': Problemy i Perspektivy*, 1(10), pp. 393–395. (In Russ.)
- Trofimov, V. T., Har'kina, M. A., Zhigalin, A. D., Baraboshkina, T. A. 2019. Technogenic transformation of ecological functions of abiotic spheres of the Earth under the influence of military activity. *Moscow University Geology Bulletin*, 1, pp. 3–13. EDN: XUPFWG. (In Russ.)
- Har'kina, M. A. 2004. Ecological consequences of military actions. *Energiia: Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya*, 7, pp. 56–59. EDN: OWWJQV. (In Russ.)
- Ecological rationing and quality management of soils and lands. 2013. Eds. Shoba S. A., Yakovlev A. S., Rybalsky N. G. Moscow. (In Russ.)
- Bausinger, T., Bonnaire, E., Preuss, J. 2007. Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. *Science of the Total Environment*, 382(1–2), pp. 259–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.029>.
- Hussain, T., Gondal, M. A. 2008. Monitoring and assessment of toxic metals in Gulf War oil spill contaminated soil using laser-induced breakdown spectroscopy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, pp. 391–399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9694-2>.
- Knechtenhofer, L. A., Xifra, I. O., Scheinost, A. C., Flühler, H. et al. 2003. Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: Small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(1), pp. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200390017>.

- Kochetova, Z. Yu., Bazarskii, O. V., Maslova, N. V. 2018. Filtration of heavy metals in soils with different degrees of urbanization and technogenic load. *Russian Journal of General Chemistry*, 88(13), pp. 2990–2996. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1070363218130261>. EDN: NKOHNE.
- Lafond, S., Blais, J. F., Mercier, G., Martel, R. 2014. A counter-current acid leaching process for the remediation of contaminated soils from a small-arms shooting range. *Soil and Sediment Contamination*, 23(2), pp. 194–210. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2014.808171>.
- Meerschman, E., Cockx, L., Islam, M. M., Meeuws, F. et al. 2011. Geostatistical assessment of the impact of World War I on the spatial occurrence of soil heavy metals. *Ambio*, 40, pp. 417–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0104-6>.
- Okkenhaug, G., Gebhardt, K.-A. G., Amstaetter, K., Bue, H. L. et al. 2016. Antimony (Sb) and lead (Pb) in contaminated shooting range soils: Sb and Pb mobility and immobilization by iron based sorbents, a field study. *Journal of Hazardous Materials*, 307, pp. 336–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.005>.
- Tandy, S., Meier, N., Schulin, R. 2017. Use of soil amendments to immobilize antimony and lead in moderately contaminated shooting range soils. *Journal of Hazardous Materials*, 324, Part B, pp. 617–625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.034>.
- Tomić, N. T., Smiljanić, S., Jović, M., Gligorić, M. et al. 2018. Examining the effects of the destroying ammunition, mines, and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit: Part 1 – pseudo-total concentration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229. Article number: 301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3957-0>.

Сведения об авторах

Кочетова Жанна Юрьевна – ул. Старых Большевиков, д. 54А, г. Воронеж, Россия, 394064; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", д-р геогр. наук, доцент; e-mail: zk_vva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>

Zhanna Yu. Kochetova – 54A Sarykh Bolshevikov Str., Voronezh, Russia, 394064; Military Educational and Scientific Center Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Dr Sci. (Geography), Associate Professor; e-mail: zk_vva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>

Лазарев Илья Сергеевич – ул. Старых Большевиков, д. 54А, г. Воронеж, Россия, 394064; Военный учебно-научный центр Военно-Воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", помощник начальника отдела Центра (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров); e-mail: lazarev-ilya@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7461-1651>

Ilya S. Lazarev – 54A Sarykh Bolshevikov Str., Voronezh, Russia, 394064; Military Educational and Scientific Center Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Assistant to the head of the Department of the Center (organization of scientific work and training of scientific and pedagogical personnel); e-mail: lazarev-ilya@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7461-1651>

Зиброва Надежда Владимировна – Петровско-Разумовская ал., д. 12А, г. Москва, Россия, 127083; "Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил" Министерства обороны Российской Федерации, канд. геогр. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; e-mail: vaiu@mil.ru

Nadezhda V. Zibrova – 12A Petrovsko-Razumovsky Ave., Moscow, Russia, 127083; "The Central Scientific Research Institute of Military-air Forces" the Ministry of Defence of the Russian Federation, Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Senior Research Assistant; e-mail: vaiu@mil.ru

Базарский Олег Владимирович – ул. Старых Большевиков, д. 54А, г. Воронеж, Россия, 394064; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", д-р физ.-мат. наук, профессор; e-mail: z_vaiu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2851-716X>

Oleg V. Bazarskiy – 54A Sarykh Bolshevikov Str., Voronezh, Russia, 394064; Military Educational and Scientific Center Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Dr Sci. (Phys.&Math.), Professor; e-mail: z_vaiu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2851-716X>