

Научная статья

УДК 614.76

doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-126-136

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ (НА ПРИМЕРЕ ПРИАЭРОДРОМНОЙ ТЕРРИТОРИИ)

Жанна Юрьевна Кочетова^{1✉}, Илья Сергеевич Лазарев²^{1,2} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия¹ zk_vva@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>, Scopus Author ID: 6507543337, Author ID: 354688, SPIN-код: 5866-5956, Istinaresearcher ID: 115377347² lazarev-ilya@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7461-1651>, Author ID: 1108711, SPIN-код: 7511-5172

Аннотация. Рассматривается проблема объективной оценки геоэкологической ситуации приаэродромной территории по стандартным методикам расчета суммарного показателя с учетом превышения предельно допустимых или фоновых концентраций загрязнителей. Предложена методика расчета комплексного показателя, который может учитывать разноразмерные характеристики загрязнения почв: кратность превышения условно-естественных фоновых концентраций, частоту превышения предельно допустимых концентраций загрязнителей, их класс опасности, назначение и способность почв к регенерации. Для этого использовали переход от численных значений параметров загрязнения почв к векторному пространству. Комплексный показатель загрязнения почв предполагает суммирование длин векторов установленных приоритетных загрязнителей, которые оказывают высокое или экстремально высокое влияние на загрязнение почв по совокупности разноразмерных параметров. В основу шкалы приоритетности загрязнителей положены известные научно-обоснованные градации параметров загрязнения почв. С помощью стандартных и предложенной методик расчета интегрального загрязнения почв установлена геоэкологическая ситуация на расстоянии до 8,4 км от контрольной точки аэродрома в период его штатной эксплуатации и реконструкции. Предложенный комбинированный показатель загрязнения почв отличается от существующих большей точностью и объективностью.

Ключевые слова: загрязнение почв, суммарный показатель загрязнения почв, военная экология, аэродром, приоритетные загрязнители, геохимический фон

Для цитирования: Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С. Методика оценки интегрального загрязнения почв (на примере приаэродромной территории) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 3(62). С. 126–136. doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-126-136.

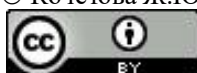
Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-126-136

METHODOLOGY FOR ASSESSING INTEGRAL SOIL POLLUTION (USING THE EXAMPLE OF AN AERODROME ENVIRONS)

Zhanna Yu. Kochetova^{1✉}, Ilya S. Lazarev²^{1,2} N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia¹ zk_vva@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>, Scopus Author ID: 6507543337, Author ID: 354688, SPIN-code: 5866-5956, Istinaresearcher ID: 115377347² lazarev-ilya@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7461-1651>, Author ID: 1108711, SPIN-code: 7511-5172

Abstract. The paper deals with the problem of an objective assessment of the geoecological situation of the aerodrome environs according to standard methods used for calculating the total indicator taking into consideration the excess of the maximum permissible or background concentrations of pollutants. We propose a method for calculating a complex indicator that can take into account heterogeneous characteristics of soil pollution: the multiplicity of excess of conditionally natural background concentrations, the frequency of



Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С.

exceeding the maximum permissible concentrations of pollutants, their hazard class, the soil use category and ability of soils to regenerate. For this, we used transition from numerical values of soil pollution parameters to a vector space. The complex indicator of soil pollution involves totaling the lengths of vectors of established priority pollutants that have a high or extremely high impact on soil pollution according to a set of heterogeneous parameters. The priority scale of pollutants is based on well-known scientifically grounded gradations of soil pollution parameters. With the help of standard and the proposed methods for calculating integral soil pollution, the geoecological situation was determined at a distance of up to 8,4 km from the reference point of the aerodrome during its regular operation and during reconstruction. The proposed combined indicator of soil pollution differs from the existing ones with greater accuracy and objectivity.

Keywords: soil pollution, soil pollution total indicator, military ecology, aerodrome, priority pollutants, geochemical background

For citation: Kochetova Z.Yu., Lazarev I.S. (2022). Methodology for assessing integral soil pollution (using the example of an aerodrome environs). *Geographical Bulletin*. No. 3(62). Pp. 126–136. doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-126-136.

Введение

Проблемы объективной оценки суммарного загрязнения почв (грунтов) вызваны разнообразием их физических, физико-химических, биологических свойств и обширным списком потенциальных загрязнителей. Химические загрязнители могут характеризоваться высокой реакционной способностью. В зависимости от их качественного и количественного соотношения, свойств почв, климатических условий они способны образовывать продукты взаимодействия с еще большей опасностью, чем первичные загрязнители [1; 18]. Представленные в литературе методики и модели интегральной оценки загрязнения почв не учитывают все возможные комбинации загрязнителей и условий их трансформации в почвах [6; 8; 14].

Стандартные методики интегральной оценки загрязнения почв основаны на сравнении фактических концентраций загрязнителей (C) с установленными лабораторным способом для индивидуальных химических загрязнителей предельно допустимыми концентрациями (ПДК) или фоновыми концентрациями ($C_{\text{фон}}$), характерными для отдельного региона или исследуемой территории [13]. С учетом коэффициента опасности загрязнения почв ($K_o = C/\text{ПДК}$) оценку проводят по наиболее токсичному показателю, содержание которого превалирует над остальными загрязнителями. Главным недостатком такого подхода является то, что не учитывается эффект суммации воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду. Кроме того, возникает множество вопросов к объективности оценки загрязнения почв в тех случаях, когда установленные ПДК ниже фоновых концентраций загрязняющих веществ в почве для отдельных регионов [3; 16].

В настоящее время наиболее распространен суммарный показатель загрязнения почв Z , рассчитанный как сумма коэффициентов концентраций индивидуальных загрязнителей ($K_k = C/C_{\text{фон}}$) [13]. Помимо различных организационных вопросов, связанных в основном с отсутствием утвержденных фоновых концентраций для отдельных регионов, правил их установления и периодичности обновления, возникает множество вопросов к самой методике расчета. Суммарный показатель загрязнения почв не учитывает классы опасности веществ, при этом в результате расчетов могут получиться одинаковые численные значения Z в случае превалирующего загрязнения почв малоопасными керосином и марганцем или высокотоксичными цинком и кадмием, что априори не может быть расценено как одинаковый уровень воздействия на окружающую среду. Поэтому сумма коэффициентов концентраций малоопасных и высокотоксичных веществ без учета классов их опасности может отражать лишь техногенную нагрузку на данной территории, а при оценке эколого-медицинской ситуации не имеет смысла.

В соответствии с ГОСТом 17.4.3.06-2020 Z возможно рассчитывать как сумму коэффициентов опасности индивидуальных загрязнителей без учета региональных

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С.

геохимических особенностей почв, что также не отражает реальную экологическую ситуацию и не позволяет проводить сравнительный анализ техногенного загрязнения почв отдельных территорий [2; 6; 15]. Фоновые концентрации для различных регионов могут варьироваться в широких интервалах, а для отдельных загрязнителей они могут превышать ПДК [3; 16]. В ГОСТе не прописано, какие именно и сколько загрязняющих вещества необходимо учитывать при расчете Z . Вместе с тем на значение суммарного показателя загрязнения почв оказывает влияние число слагаемых коэффициентов опасности и концентрации. Во многих работах суммируются только те K_0 , которые превышают единицу, но не совсем понятно, почему $K_0=1,1$ для вещества IV класса опасности надо учитывать, а $K_0=0,9$ для вещества I класса – нет.

Ранговая шкала качества почв при этом остается той же, что и для Z , рассчитанного с учетом фоновых концентраций загрязнителей в почвах. Поэтому уровень загрязнения почв по результатам расчета Z относительно ПДК обычно завышен.

Таким образом, остается актуальной разработка новых подходов к оценке уровня загрязнения почв техногенно нагруженных территорий. Проблема вызвана, прежде всего, тем, что для объективной оценки качества почв необходимо учитывать различные по смыслу и размерностям характеристики как самих загрязнителей, так и условий их распространения. Поэтому от численных алгебраических значений характеристик загрязнения почв необходим переход к их векторному (безразмерному) измерению.

Цель исследований – разработка методики оценки уровня интегрального загрязнения почв приоритетными загрязняющими веществами с учетом разноразмерных характеристик (кратность превышения фона, повторяемость превышения ПДК, класс опасности загрязнителей почв). В зависимости от целей мониторинга комплексный показатель загрязнения почв может также учитывать их устойчивость к химическому загрязнению, назначение земель.

Методика апробирована в г. Воронеж на приаэродромной территории при исследовании многолетней динамики загрязнения почв.

Материалы и методы исследования

В работе представлен анализ динамики интегрального загрязнения почв приаэродромной территории, расположенной в Советском районе г. Воронеж. Период исследования включает штатный режим работы аэродрома (2007–2013 г.); масштабную реконструкцию взлетно-посадочной полосы и складов горюче-смазочных материалов (2013–2017 г.), время после реконструкции аэродрома до 2019 г. включительно.

Воздействие авиационных комплексов на загрязнение окружающей среды исследовано достаточно хорошо: установлены основные источники загрязняющих веществ, особенности их распространения и накопления в объектах окружающей среды, эколого-обусловленные заболевания населения прилегающих к аэродромам территорий [4; 7]. Но в литературе практически нет данных о влиянии реконструкции аэродромов и аэропортов на экологическую ситуацию прилегающих территорий, которые, как правило, включают рекреационные, селитебные зоны и сельскохозяйственные угодья [5]. Вместе с тем перемещение колоссальных объемов десятилетиями загрязняемых грунтов аэродромов и атмосферный перенос пылевых частиц с адсорбированными загрязнителями могут оказывать негативное влияние на окружающую среду в радиусе нескольких км от источника [9; 17].

Отбор проб почв проводили 4 раза в год на различном расстоянии от контрольной точки аэродрома (КТА – геометрический центр взлетно-посадочной полосы) в соответствии с преобладающими ветрами, как показано на рис. 1. Для определения условно-естественного геохимического фона проводили отбор проб почв в точке 1, расположенной в санатории им. Горького на расстоянии 13,6 км от КТА. Точки пробоотбора почв 2–4 находятся в юго-восточном направлении от КТА на расстоянии 2,7; 3,5; 8,4 км на территориях дачного

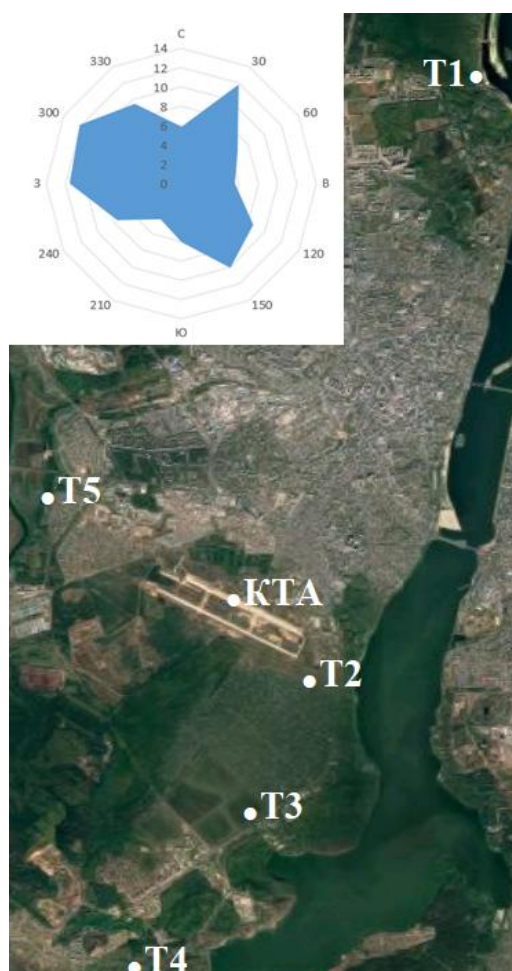


Рис. 1. Карта-схема точек пробоотбора почв

Fig. 1. The map of soil sampling points

поселка, сельскохозяйственных угодий и пос. Малышево соответственно. Точка пробоотбора почв 5 расположена в пос. Тепличный под глиссадой западнее КТА на 4,4 км.

На территории поселков Тепличный и Малышево почвы классифицированы как суглинки; в дачном поселке Сады и на территории сельскохозяйственных угодий – чернозем типичный. Гранулометрический состав исследуемых почв существенно отличается. Для селитебной территории характерно неравномерное распределение среднезернистого песка, встречаются осколки битого кирпича и гравий. Приповерхностный исследуемый слой глубиной до 20 см на 76% состоит из частиц размером 0,25–0,05 мм. В черноземе наблюдаются близкие значения содержания разных фракций до глубины 20 см; незначительно преобладают частицы, относящиеся к мелкой пыли (35,1% частиц с размером 0,01–0,005 мм).

Показатель кислотности (pH_{KCl}) исследуемых почв на протяжении многолетнего мониторинга изменялся от слабо кислого до слабо щелочного. Максимальное повышение pH_{KCl} почв наблюдалось в пос. Сады с 2013 г., что связано с началом интенсивных строительных работ на аэродроме. Щелочной сдвиг реакции среды чернозема ($pH_{KClmax}=7,6$) обусловлен распространением строительной

пыли, содержащей карбонаты кальция и магния; повышением концентрации солей тяжелых металлов и их оксидов при интенсивной деятельности грузового автотранспорта, строительного оборудования.

В сертифицированной лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области» определяли содержание в почвах приоритетных загрязнителей объектов авиационной деятельности – свинца (Pb), цинка (Zn), никеля (Ni), марганца (Mn), меди (Cu), кадмия (Cd), нефтепродуктов (НП), нитратов и нитритов суммарно (NO_3^- и NO_2^-), формальдегида (ФА) [5]. Суммарный показатель загрязнения почв Z рассчитывали с учетом коэффициентов концентрации загрязняющих веществ и числа загрязнителей n по формуле [13]

$$Z = \left(\sum_{i=1}^n C_i / C_{фонi} \right) - (n - 1). \quad (1)$$

В зависимости от величины Z устанавливают следующие ранги загрязнения почв: допустимый ($Z \leq 16$); умеренно опасный ($Z = 16 - 32$); опасный ($Z = 32 - 128$); чрезвычайно опасный ($Z \geq 128$).

Условно-естественную фоновую концентрацию исследуемых веществ рассчитывали по данным мониторинга почв в точке пробоотбора 1 в соответствии с общей для различных природных сред формулой [10]

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С.

$$C_{\phi i} = C_{\text{ср}i} + (\sigma_i \cdot t_{st})/\sqrt{n}, \quad (2)$$

где $C_{\text{ср}i}$ – средняя концентрация i -того вещества в точке отбора проб 1, мг/кг; σ_i – среднее квадратичное отклонение концентрации; t_{st} – коэффициент Стьюдента при $P=0,95$; n – число измерений концентрации i -того вещества.

Результаты и их обсуждение

Уровень загрязнения почв в точке пробоотбора 1 на протяжении всего периода исследований незначительно повышался в большей степени из-за роста концентрации нитратного азота и нефтепродуктов. Поэтому для расчета условно-естественных фоновых концентраций загрязняющих веществ использовали результаты анализа почв с 2007 по 2015 г., исключая anomalously высокие или низкие значения. Среднеквадратичное отклонение от рассчитанных значений $C_{\text{фон}}$ не превышает 30%, что свидетельствует об удовлетворительной достоверности результатов (табл. 1).

Таблица 1

Условно-естественные фоновые концентрации исследуемых загрязнителей почв ($P=0,95$; $t_{st}=2$)
Conditionally natural background concentrations of the studied soil pollutants ($P=0.95$; $t_{st}=2$)

Загрязняющее вещество	Среднее значение концентрации $C_{\text{ср}}$, мг/кг	Средне-квадратичное отклонение, σ	Длина выборки, n	Условно-естественный фон $C_{\text{фон}}$, мг/кг
Pb	5,12	1,60	30	5,70
Zn	15,3	2,8	34	16,3
Ni	5,58	1,43	34	6,10
Mn	71,1	13,5	32	76,4
Cu	6,19	1,93	33	6,84
Cd	0,220	0,071	30	0,240
НП	46,5	9,3	32	49,7
NO ₃ -	3,12	0,44	31	3,28
ФА	0,250	0,0060	30	0,250

Полученные значения условно-естественных фоновых концентраций загрязняющих веществ на исследуемой территории меньше установленных нормативов, в том числе в ~2 раза – для нефтепродуктов и кадмия, ~5 раз – для меди, ~21 раз – для марганца, ~28 раз – для формальдегида, ~295 раз – для нитратов. Результаты расчета суммарного показателя загрязнения почв Z с учетом фактических и фоновых концентраций загрязнителей представлены на рис. 2.

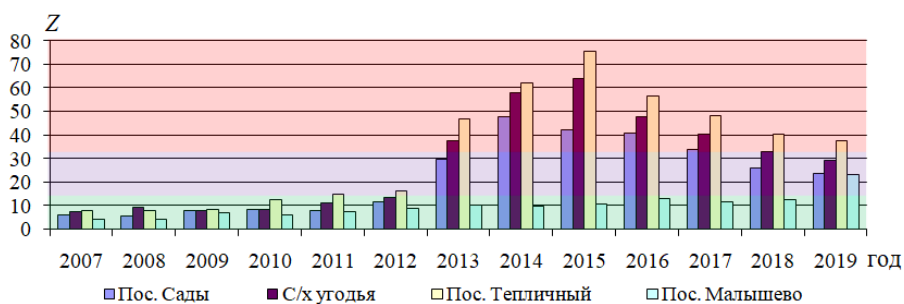


Рис. 2. Динамика суммарного показателя загрязнения почв приаэродромной территории
Fig. 2. Dynamics of the total index of soil contamination of the aerodrome environs

В соответствии со стандартной методикой оценки интегрального загрязнения почв, в штатном режиме эксплуатации аэродрома до 2013 г. экологическая ситуация на приаэродромной территории в основном соответствовала рангу «допустимая». С начала реконструкции аэродрома суммарный показатель загрязнения почв скачкообразно увеличился, максимальный Z установлен на удалении от КТА в пос. Тепличный, и на территории

сельскохозяйственных угодий он соответствовал «высоко опасному» рангу загрязнения почв. До 2019 г. уровень загрязнения почв в контрольных точках 2–4 постепенно снижался; в пос. Сады и на территории сельскохозяйственных угодий – до ранга «умеренно опасный».

Максимальное превышение фоновых концентраций характерно для керосина. В 2015 г., когда проводились основные работы по реконструкции склада горюче-смазочных материалов, на территориях пос. Тепличный и сельскохозяйственных угодий коэффициент концентрации нефтепродуктов составлял 28,4 и 20,1 соответственно. Ближе к аэродрому, в пос. Сады, этот же показатель был равен 10,2, что объясняется известной закономерностью переноса частиц грунта с адсорбированными загрязнителями атмосферным воздухом [9].

Аналогичное пространственное распределение характерно и для других загрязнителей, причем в пос. Тепличный уровень загрязнения по отдельным компонентам всегда был несколько выше, чем в других контрольных точках, что объясняется геометрией розы ветров (рис. 1). Фактические концентрации тяжелых металлов в почвах пос. Тепличный и на территории сельскохозяйственных угодий превышали $C_{фон}$ в ~5–12 раз. Убывающий ряд коэффициентов концентрации тяжелых металлов на приаэродромной территории во время реконструкции аэродрома имеет вид: $Pb_{12,1} > Cu_{8,8} > Ni_{6,8} > Mn_{6,4} > Zn_{5,3} > Cd_{5,2}$. Суммарное содержание нитратного и нитритного азота в почвах превышало $C_{фон}$ в ~6–9 раз; формальдегида – в ~7–9,5 раз.

Дальнейшие расчеты в статье приведены для наиболее загрязненных почв исследуемого участка (ТЗ – сельскохозяйственные угодья, Т5 – пос. Тепличный).

Как было отмечено выше, интегральная оценка загрязнения почв относительно фоновых значений исследуемых показателей не учитывает их класс опасности, а лишь показывает динамику повышения валовых концентраций тех или иных загрязнителей антропогенного происхождения, что исключает возможность оценки санитарно-эпидемиологической обстановки. Кроме того, для оценки вклада индивидуального компонента в суммарный показатель загрязнения почв необходимо учитывать вероятность превышения его фактической концентрации предельно допустимой на данной территории. Это позволит установить приоритетные загрязняющие вещества, обязательные для контроля на исследуемой территории и учитываемые при расчете интегрального показателя.

В предложенной методике оценки качества почв предлагается учитывать три параметра: повторяемость превышения фактической концентрации загрязнителя в почве ПДК α_i , кратность превышения условно-естественных фоновых концентраций загрязняющих веществ β_i (по аналогии со стандартной методикой [11]); параметр γ_i , соответствующий классу опасности загрязнителей (введен в методику авторами в соответствии с [13]). Для интеграции различных по смыслу и размерностям показателей α_i , β_i и γ_i в единый индекс, назовем его приоритетность загрязнителя Z_i , предлагается переход от численных алгебраических значений параметров загрязнителей почв к их векторному измерению.

На первом этапе необходимо ранжировать каждый параметр, основываясь на известных методиках [11; 13], как показано в табл. 2. Чем выше ранг параметра, тем больший вклад он вносит в индекс приоритетности загрязнителя.

Таблица 2

Градации параметров загрязнителей почв
Gradations of soil pollutant parameters

Ранг	Повторяемость α_i %		Кратность β_i		Опасность γ_i
	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Характеристика
1	[1–10)	Единичная	[1–2)	Низкая	Не опасные
2	[10–30)	Неустойчивая	[2–3)	Средняя	Мало опасные
3	[30–50)	Устойчивая	[3–5)	Высокая	Опасные
4	[50–100)	Характерная	[5–∞)	Экстремальная	Высоко опасные

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С.

Введем трехмерное пространство параметров $Z_i = f(\alpha_i; \beta_i; \gamma_i)$, где началом отсчета является безопасный первый ранг, равный единице ($\alpha_i=1; \beta_i=1; \gamma_i=1$). Тогда геометрическое расстояние между безопасным рангом и последующими равно

$$|Z_i| = ((\alpha_i - 1)^2 + (\beta_i - 1)^2 + (\gamma_i - 1)^2)^{1/2}. \quad (3)$$

Этот вектор является интегральным показателем приоритетности загрязняющих веществ. В векторном пространстве длина и направление вектора Z зависят от комбинации учитываемых параметров загрязнителей α , β и γ . Исходные данные для установления параметров исследуемых загрязнителей представлены в табл. 3.

Таблица 3

Гигиенические характеристики исследуемых загрязнителей почвы [12; 13]

Hygienic characteristics of the studied soil pollutants [12; 13]

Загрязнитель	Pb	Zn	Ni	Mn	Cu	Cd	НП	NO ₃ ⁻	ФА*
ОДК, мг/кг	130	220	80	1500	132	2,0	100	130	7,0
Класс опасности	2	1	2	3	2	1	3	3	2

* Для формальдегида на сегодняшний день установлена ПДК без учета свойств почв

* For formaldehyde, the current MPC is set without regard to soil properties

Например, в 2014 г. показатели загрязнения почв керосином составляли $\alpha_i=100\%$, $\beta_i=9,8$ и $\gamma_i=3$, что соответствует рангам (координатам вектора) 4, 4, 3. Аналогично устанавливали координаты векторов по каждому загрязнителю, примеры которых приведены на рис. 3.

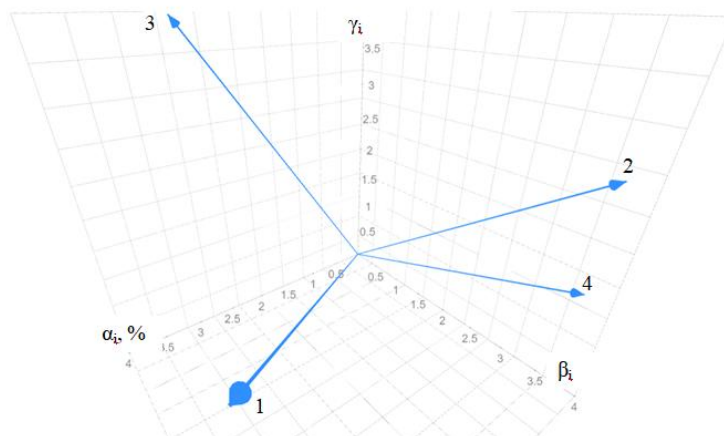


Рис. 3. Трехмерное пространство параметров загрязнителей почвы:

1 – керосин; 2 – формальдегид; 3 – цинк; 4 – марганец (2014 г.)

Fig. 3. Three-dimensional space of soil pollutant parameters:

1 – kerosene; 2 – formaldehyde; 3 – zinc; 4 – manganese (2014)

Максимальная длина вектора $|Z_i|_{\max}=5,20$ характерна для худшей комбинации параметров загрязнителей, когда все их ранги максимальны ($\alpha_i=4; \beta_i=4; \gamma_i=4$).

Такой подход позволяет перейти от трех ранжируемых параметров каждого загрязнителя к единой шкале оценки его приоритетности:

I) $|Z_i|=0$ – исследуемый загрязнитель находится на уровне ниже предела обнаружения метода, его не учитывают при расчетах;

II) $|Z_i|\leq 1,73$ – среднее влияние на загрязнение почвы;

III) $|Z_i|=(1,73-3,46]$ – высокое влияние;

IV) $|Z_i|=[3,46-5,20)$ – чрезвычайно высокое влияние.

Соединения с высоким и чрезвычайно высоким влиянием на загрязнения почв относятся к приоритетным загрязнителям, которые необходимо учитывать при расчете суммарного показателя Z .

Расчет $|Z_i|$ для исследуемых загрязнителей по формуле 3 показал различное влияние индивидуальных соединений на загрязнение почв приаэродромной территории в различные периоды времени (рис. 4).

В период штатной работы аэродрома среднее влияние на загрязнение почв оказывали свинец, никель и марганец. С начала реконструкции аэродрома их приоритетность $|Z_i|$ возросла более чем в 2 раза, при этом установлено чрезвычайно высокое влияние на загрязнение почв цинка – элемента I класса опасности. Следует отметить, что длина вектора $|Z_i|$ возросла в большей степени для металлов, чем для формальдегида и нефтепродуктов, что, вероятно, связано с их длительной фильтрацией в почвах, накоплением на геохимических барьерах, адсорбцией на частицах грунта и их атмосферным переносом при изъятии грунта с глубины до 3 м при реконструкции ВПП. Формальдегид и керосин способны

трансформироваться в почвах и частично испаряться, поэтому их влияние на загрязнение почв приаэродромной территории увеличилось в меньшей степени, оставаясь на уровне «высокое». Вклад в загрязнение почв нитратного азота практически не изменился. Это связано с высоким значением ПДК нитратов в почвах, которое за весь период исследования не было превышено ни в одной из контрольных точек. В то же время нитраты являются приоритетными загрязнителями приаэродромных территорий, кратность превышения их фоновых концентраций на протяжении всего периода наблюдений изменялась от 1,2 до 7,2.

Удельный суммарный индекс загрязнения почв предлагается рассчитывать как сумму длин векторов, отражающих вклад n числа приоритетных загрязнителей с учетом класса их опасности, повторяемости превышения ПДК и кратности превышения условно-естественного гидрохимического фона:

$$Z = (|Z_1| + |Z_2| + \dots + |Z_n|) / n. \quad (4)$$

В стандартных методиках расчета суммарного показателя загрязнения почв суммируются коэффициенты концентрации всех исследуемых загрязнителей, что приводит к заниженным значениям суммарных индексов из-за эффекта «разбавления» опасных загрязнителей менее опасными. Такой подход не учитывает совокупного влияния загрязнителей на загрязнение почв и, по сути, противоречит самой цели установления их безопасности. Поэтому имеет смысл находить среднее значение длин векторов, отражающих влияние n числа только приоритетных (равноопасных) загрязнителей почв.

Сверху суммарный индекс загрязнения почв Z ограничен значением 5,20, что соответствует наихудшей комбинации параметров всех исследуемых приоритетных загрязнителей (4; 4; 4). Снизу суммарный индекс загрязнения почв ограничен значением 1,73. Значения $Z = (1,73 - 3,46]$ соответствуют высокому уровню загрязнения почв. При $Z > 3,46$ загрязнение почв ранжируется как чрезвычайно высокое. Если ни один исследуемый показатель не относится к приоритетным загрязнителям по совокупности параметров α_i , β_i , γ_i , то почвы можно считать условно чистыми.

В соответствии с предложенной методикой, с 2007 по 2012 г. суммарный показатель

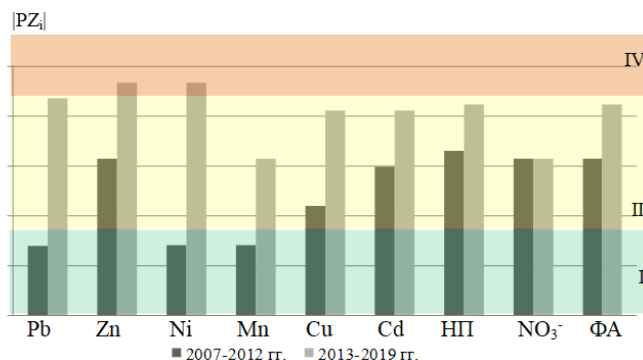


Рис. 4. Шкала приоритетности загрязнителей почв приаэродромной территории в периоды штатной работы и реконструкции аэродрома: II – среднее влияние; III – высокое влияние; IV – чрезвычайно высокое влияние
Fig. 4. Priority scale of soil pollutants of the aerodrome environs in the periods of normal operation and reconstruction of the aerodrome: II – medium impact; III – high impact; IV – extremely high impact

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С.

загрязнения почв исследуемого участка приаэродромной территории рассчитывается по 6 приоритетным загрязнителям, он соответствует высокому уровню загрязнения ($Z=2,99$). С 2013 г. индекс Z рассчитывали по 9 приоритетным загрязнителям, при этом для всех годов он был больше значения 3,90, что соответствует чрезвычайно высокому загрязнению почв.

Выводы

Исследована динамика интегрального загрязнения почв приаэродромной территории в г. Воронеж в соответствии со стандартной методикой, которая учитывает кратность превышения фоновых концентраций загрязняющих веществ и их число. Основными недостатками такого подхода являются: необоснованность выбора загрязнителей почв, учитываемых в расчетах суммарного показателя; суммирование коэффициентов концентрации веществ без учета их класса опасности и повторяемости превышения ПДК.

Для более точной оценки загрязнения почв установлен условно-естественный геохимический фон для 9 загрязняющих веществ. Переход от численных значений характеристик загрязнения почв по каждому веществу к векторному пространству позволил разработать единый индекс, сочетающий в себе разноразмерные характеристики загрязнителей почв – кратность превышения условно-естественного гидрохимического фона загрязняющих веществ, частоту превышения ПДК и их класс опасности. В основу были взяты научно-обоснованные ранги загрязнения почв, представленные в стандартных методиках.

Разработанная шкала приоритетности загрязнителей для исследуемого участка позволила установить наиболее опасные загрязнители, вносящие максимальный вклад в загрязнение почв в различные годы исследования. Длины векторов, соответствующие высокому влиянию загрязнителей почв приаэродромной территории в период штатной эксплуатации аэродрома, характерны для цинка, меди, кадмия, нефтепродуктов, нитратов, формальдегида. С начала реконструкции аэродрома список был дополнен свинцом, никелем и марганцем. Чрезвычайно высокое влияние на загрязнение почв в период реконструкции аэродрома оказывают цинк и никель – элементы I и II класса опасности соответственно.

Интегральный индекс загрязнения почв предполагает суммирование длин векторов, соответствующих только приоритетным загрязнителям. Он не учитывает те загрязнители, вклад которых в загрязнение почв незначителен по совокупности параметров (кратность превышения фона, повторяемость превышения ПДК, класс опасности). Предложенный показатель является более надежным и объективным, чем стандартный. В соответствии с ним в период штатной работы аэродрома загрязнение почв на приаэродромной территории классифицируется как высокое, а во время масштабной реконструкции аэродрома – как чрезвычайно высокое.

Разработанный индекс является универсальным и может быть использован для интегральной оценки загрязнения не только почв, но и вод, воздуха. Полученные результаты исследования загрязнения почв приаэродромной территории в период реконструкции аэродрома могут быть полезными для специалистов в области охраны окружающей среды и техносферной безопасности при проведении подобных мероприятий в других регионах Российской Федерации.

Список источников

1. Безносинов В.А., Кондратенко Б.М., Габов Д.Н., Яковлева Е.В. Полициклические ароматические углеводороды: состав, критерии оценки загрязнения почв в условиях техногенеза // Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2007. № 10(120). С. 17–22.
2. ГОСТ 17.4.3.06-86. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.
3. Дабыхов М.В., Дабыхова Е.В., Титова В.И. Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования. Н. Новгород: Нижегород. ГСХА, 2005. 165 с.

Экология и природопользование

Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С.

4. Клепиков О.В., Филимонова О.Н., Енютина М.В., Назаренко И.Н. Обзор исследований по оценке неблагоприятного влияния военных аэродромов на окружающую среду // *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2019. № 11. С. 93–103.
5. Кочетова Ж.Ю. Авиационно-ракетный кластер как новый класс объектов геоэкологического мониторинга // *Географический вестник*. 2019. № 3(50). С. 79–91.
6. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Маслова Н.В. Сравнительный анализ интегральных показателей загрязнения почвогрунтов урбанизированных территорий приоритетными контаминантами // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2018. № 1(125). С. 28–37.
7. Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Бакланов И.О. Мониторинг и прогнозирование загрязнения приаэродромных территорий (на примере г. Энгельс) // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2019. № 56. С. 126–132.
8. Околелова А.А., Минкина Т.М., Мерзлякова А.С., Кожевникова В.П. Достоверность оценки загрязнения почв тяжелыми металлами // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014. № 101. С. 465–479.
9. Петелин А.Л., Орелкина Д.И., Новикова Е.А. Аэрозольный перенос газовых выбросов промышленных предприятий на дальние расстояния // *Вопросы науки и образования*. 2019. Т. 3. № 47. С. 10–22.
10. Приказ Министерства природных ресурсов РФ № 328. «Об утверждении Методических указаний по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты». Дата введения 12.12.2007. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902083847> (дата обращения: 17.03.2022).
11. РД 52.24.643. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов н/Д.: Росгидромет, 2002. 55 с.
12. Рубин В.М., Ильюкова И.И., Кремко Л.М., Присмотров Ю.А., Самсонова А.С., Володько И.К., Лукашев О.В. Гигиеническое обоснование нормативов ПДК нефтепродуктов в почвах Республики Беларусь // *Гигиена и санитария*. 2013. № 2. С. 99–101.
13. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: постановление главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2.М., 2021. 635 с.
14. Сладкова Ю.Н., Крийт В.Е., Бадаева Е.А. Об основных проблемах, возникающих при проведении санитарно-эпидемиологической экспертизы результатов лабораторных исследований почвы населенных мест // *Гигиена и санитария*. 2018. Т. 97. № 12. С. 1146–1151.
15. Хайрулина Е.А., Тимофеев И.В., Кошелева Н.Е. Потенциально токсичные элементы в почвах индустриального района Перми // *Географический вестник*. 2019. № 2. С. 80–100.
16. Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель / под общ. ред. С.А. Шобы, А.С. Яковлева, Н.Г. Рыбальского. М.: НИИ-Природа, 2013. 310 с.
17. Ivanov A.V., Strizhenok A.V. Evaluation of the effectiveness of dust screens and the possibilities of taking into account their influence in software models. *Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Complex equipment and quality control laboratories (CEQCL)*. 2021. no. 1728. P. 012008.
18. Rodin I.A., Smirnov R.S., Smolenkov A.D., Shpigun O.A., Krechetov P.P. Transformation of unsymmetrical dimethylhydrazine in soils // *Eurasian Soil Science*. 2012. Vol. 45. no. 4. P. 386–391.

References

1. Beznosikov, V.A., Kondratenok, B.M., Gabov, D.N. and Yakovleva, E.V. (2007), Polycyclic aromatic hydrocarbons: composition, criteria for assessing soil pollution under conditions of technogenesis, *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo centra Ural'skogo otdeleniya RAN*, no.10(120), pp. 17–22.
2. GOST 17.4.3.06-2020 (2020), *Gosudarstvennyj standart Soyuza SSR. Ohrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k klassifikacii pochv po vliyaniyu na nih himicheskikh zagryaznyayushchih veshchestv* [The state standard of the USSR. Nature conservation. Soil. General requirements for the classification of soils by the effect of chemical pollutants on them], Moscow, Russia.
3. Dabahov, M.V., Dabahova, E.V., Titova, V.I. (2005), *Tyazhelye metally: ekotoksikologiya i problemy normirovaniya* [Heavy metals: ecotoxicology and problems of rationing], “Nizhegor. GSHA”, N. Novgorod, Russia.
4. Klepikov, O.V., Filimonova, O.N., Enyutina, M.V., Nazarenko, I.N. (2019), Review of studies on the assessment of the adverse impact of military airfields on the environment, *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, no. 11, pp. 93–103.
5. Kochetova, Zh.Yu. (2019), Aviation-rocket cluster as a new class of objects of geoeological monitoring, *Geograficheskij vestnik*, no. 3(50), pp. 79–91.
6. Kochetova, Zh.Yu., Bazarskij, O.V., Maslova, N.V. (2018), Comparative analysis of integral indicators of soil contamination of urbanized territories by priority contaminants, *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 1(125), pp. 28–37.
7. Lazarev, I.S., Kochetova, Zh.Yu., Bazarskij, O.V., Baklanov, I.O. (2019), Monitoring and forecasting of pollution of aerodrome territories (on the example of Engels), *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, no. 56, pp. 126–132.

*Экология и природопользование**Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С.*

8. Okolelova, A.A., Minkina, T.M., Merzlyakova, A.S., Kozhevnikova, V.P. (2014), Reliability of assessment of soil pollution by heavy metals, *Politematicheskij setевой elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, no. 101, pp. 465–479.

9. Petelin, A.L., Oreikina, D.I., Novikova, E.A. (2019), Aerosol transfer of gas emissions from industrial enterprises over long distances, *Voprosy nauki i obrazovaniya*, vol. 3, no. 47, pp. 10–22.

10. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation no. 328 (2007), On approval of Methodological guidelines for the development of standards of permissible impact on water bodies, available at: <https://docs.cntd.ru/document/902083847> (Accessed March 17 2022).

11. Guidance document 52.24.643 (2002), Method of comprehensive assessment of the degree of contamination of surface waters by hydrochemical indicators, Roshydromet, Rostov-na-Donu, Russia.

12. Rubin V.M., Il'yukova I.I., Kremko L.M., Prismotrov Yu.A., Samsonova A.S., Volod'ko I.K., Lukashev O.V. (2013), Hygienic justification of the MPC standards of petroleum products in the soils of the Republic of Belarus, *Gigiena i sanitariya*, no. 2, pp. 99–101.

13. Sanitary rules and regulations 1.2.3685-21 (2021), Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans, Moscow, Russia.

14. Sladkova, Yu.N., Krijt, V.E., Badaeva, E.A. (2018), About the main problems arising during the sanitary-epidemiological examination of the results of laboratory studies of the soil of populated areas, *Gigiena i sanitariya*, vol. 97, no. 12, pp. 1146–1151.

15. Hajrulina, E.A., Timofeev, I.V., Kosheleva, N.E. (2019), Potentially toxic elements in the soils of the industrial district of Perm, *Geograficheskij vestnik*, no. 2, pp. 80–100.

16. Shoba, A.S. (2013), *Ekologicheskoe normirovanie i upravlenie kachestvom pochv i zemel'* [Environmental regulation and quality management of soils and lands], in Shoba, A.S. and Yakovlev, N.G., NIA-Priroda, Moscow, Russia.

17. Ivanov, A.V., Strizhenok, A.V. (2021), Evaluation of the effectiveness of dust screens and the possibilities of taking into account their influence in software models, *Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Complex equipment and quality control laboratories (CEQCL)*, no. 1728, pp. 012008.

18. Rodin, I.A., Smirnov, R.S., Smolenkov, A.D., Shpigun, O.A., Krëchetov, P.P. (2012), Transformation of unsymmetrical dimethylhydrazine in soils, *Eurasian Soil Science*, vol. 45, no. 4, pp. 386–391.

Статья поступила в редакцию: 22.06.22; одобрена после рецензирования: 20.07.2022; принята к опубликованию: 19.09.2022.

The article was submitted: 22 June 22; approved after review: 20 July 2022; accepted for publication: 19 September 2022.

Информация об авторах

Information about the authors

Жанна Юрьевна Кочетова

Доктор географических наук, доцент кафедры эксплуатации и ремонта средств аэродромно-технического обеспечения полетов авиации Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»;

394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А

e-mail: zk_vva@mail.ru

Илья Сергеевич Лазарев

Помощник начальника отдела Центра (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»;

394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А

e-mail: lazarev-ilya@list.ru

Zhanna Yu. Kochetova

Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Operation and Repair of Means of Aerodrome and Technical Support of Aviation Flights, Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy;

54A, Starykh Bolshevikov st., Voronezh, 394064, Russia

Ilya S. Lazarev

Assistant to the Head of the Department of the Center for organization of scientific work and training of academic and pedagogical personnel, Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy;

54A, Starykh Bolshevikov st., Voronezh, 394064, Russia

Вклад авторов

Кочетова Ж.Ю. – идея, научное редактирование текста.

Лазарев И.С. – сбор материала, обработка материала, написание статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Kochetova Z. Yu. – the idea, scientific editing of the text.

Lazarev I.S. – collection and processing of the material; writing the article.

The authors declare no conflict of interest.