

Геоэкологическая оценка загрязнения почв военного полигона общего назначения

Д. А. Пантелеев¹✉, Ж. Ю. Кочетова¹, О. В. Базарский¹,
В. П. Закусилов¹, В. Н. Нечаев¹, А. Н. Ларионов²

¹Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина, Российская Федерация
(394064, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54а)

²Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I, Российская Федерация
(394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, 1)

Аннотация. Цель – исследование закономерностей загрязнения почв в воронках различного происхождения и времени образования на военном полигоне общего назначения.

Материалы и методы. Проведен развернутый химический анализ почв, отобранных из воронок различного происхождения и времени образования на территории типичного полигона общего назначения в Центральном федеральном округе. Методом рентгеновской спектрометрии оценено содержание по высоте воронок 22 элементов, методом потенциометрии – содержание нитратного азота; рассчитана вероятность загрязнения почв по высоте воронок в зависимости от их природы и давности образования.

Результаты и обсуждение. Установлены фоновые концентрации 22 металлов и полуметаллов, а также нитратного азота. Для всех исследуемых загрязнителей почв полигона фоновые концентрации не превышают установленных нормативов, за исключением хрома. Концентрационное распределение загрязнителей по высоте воронок, образованных при сбрасывании авиационных бомб и в результате утилизации боеприпасов методом подрыва, значительно отличается. Превышение установленных нормативов элементов в почвах выявлено для мышьяка и хрома. Значительное превышение фоновых концентраций характерно для цезия, галлия, ниобия, сурьмы и скандия. ПДК нитратного азота не превышена ни в одной из точек отбора, при этом максимум его содержания зафиксирован на поверхности свежей воронки от авиаснаряда.

Выводы. Загрязнение почв на военных полигонах отличается высокой неравномерностью как на поверхности, так и по высоте воронок. Разнообразие применяемых в военном деле материалов и веществ требует более детального исследования загрязнения почв военных полигонов различных по назначению с целью установления приоритетных загрязнителей и разработки единых методик оценки загрязнения масштабных территорий.

Ключевые слова: военная экология, загрязнение почв, военные полигоны, металлы, полуметаллы, нитраты, утилизация боеприпасов, воронки.

Для цитирования: Пантелеев Д. А., Кочетова Ж. Ю., Базарский О. В., Закусилов В. П., Нечаев В. Н., Ларионов А. Н. Геоэкологическая оценка загрязнения почв военного полигона общего назначения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2024, № 4, с. 164-173. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/164-173>

ВВЕДЕНИЕ

Действующие и законсервированные объекты военной деятельности, в том числе авиационные, артиллерийские, испытательные полигоны, площадки для утилизации боеприпасов, занимают масштабные территории (от 3 % от общей площади стран ЕС до 16 % в Республике Беларусь). Эти земли даже после консервации полигонов десятилетиями не пригодны для ведения сельского хозяйства, строительства гражданских объектов, что наносит ущерб не только экологии, но и экономике государств [7].

В западных странах с 80-ых годов прошлого столетия разработаны специальные программы по оценке загрязнения депонирующих сред полигонов тяжелыми

металлами, полуметаллами, топливом, взрывчатыми и отравляющими веществами, растворителями и продуктами их трансформации с целью разработки эффективных способов очистки почв и вод. Надо отметить, что результаты проведенных за рубежом исследований зачастую не репрезентативны, так как не имеют под собой научной методической базы, в том числе не обоснованы приоритетные загрязнители объектов военной деятельности, нет единых установленных нормативов для токсикантов даже в пределах одного штата (округа), предельно допустимые концентрации одного и того же металла в почвах могут отличаться в тысячи раз, отсутствуют единые методики для интегральной оценки уровня загрязнения почв, вод, воздуха [7]. В Российской



Федерации систематических исследований экологического состояния объектов военной деятельности не проводилось, в литературе приводятся немногочисленные разрозненные данные о геохимических исследованиях территорий, находящихся в военном ведомстве [4, 6, 8, 10, 17, 20]. Однако неоспорим тот факт, что загрязнение депонирующих сред металлами, взрывчатыми веществами, растворителями, составными компонентами топлив и продуктами их трансформации на производственных площадках, в зонах конфликтов и на военных полигонах является международной проблемой [15].

В нашей стране начинают уделять этой проблеме повышенное внимание. Так, к 2020 году в Российской Федерации на специально подготовленных площадках или полигонах общего назначения было утилизировано 21500 единиц ракетно-артиллерийского вооружения, около 7

млн единиц стрелкового оружия, более 150 млн боеприпасов, 140 тыс. ракет общевойскового назначения. Для того чтобы хоть немного разгрузить опасные хранилища, Министерство обороны распорядилось уничтожить способом подрывов те боеприпасы, которые хранить стало рискованно. Массовое уничтожение списанных боеприпасов, содержащих в больших количествах свинец и ртуть, на открытых площадках неизбежно приводит к загрязнению атмосферного воздуха, почв и вод [14, 16].

Предотвратить перенос от военных полигонов токсичных соединений атмосферным воздухом на десятки километров с последующим загрязнением ими почв и вод невозможно. В работе О. Лисова приводится информация о загрязняющих веществах, которые могут поступать в окружающую среду при уничтожении боеприпасов (табл. 1).

Таблица 1

Перечень вредных и опасных веществ, подлежащих контролю при утилизации военной техники и вооружения (по О. Лисову [10], перераб. в соответствии с СанПин 1.2.3685-21 [13])
[Table 1. The list of harmful and dangerous substances subject to control during the disposal of military equipment and weapons (according to O. Lisov [10], reprint. in accordance with SanPiN 1.2.3685-21 [13])]

Химические соединения / Chemical compounds	Класс опасности / Hazard class	Предельно-допустимые концентрации, мг/м³ / Maximum permissible concentrations, mg/m3		Распространение / Distribution	Основной источник / Main source
		разовая / one-time	среднесуточная / average daily		
NO	3	0,4	–	Атмосфера, осадки	ВВ¹, ракетные топлива
NO₂	3	0,2	0,1		
CO	4	5	3	Атмосфера	
SO₂	3	0,5	0,05		
Fe₂O₃ (аэрозоль, наночастицы)	2	ПДК _{раб. зоны} = 0,4		Атмосфера, сухие вы- падения	Резка металлических конструкций
NiO (аэрозоль)	2	–	0,001		
Соединения Cr⁺⁶	1	–	0,0015	Атмосфера, сухие выпадения, грунтовые воды, почва	ВВ¹, резка металличе- ских конструкций
Cr₂O₃ (аэрозоль)	-	ОБУВ³ = 0,01			
Pb⁰, Pb⁺²	1	0,001	0,0003		ВВ
Hg⁰, Hg⁺²	1	–	0,0003		
C₂₀H₁₂ (бензапирен)	1	ПДК _{раб. зоны} = 0,00015			ГСМ⁴, ВВ¹, ракетные топлива при сжигании и взрыве
Пыль асбестосо- держащая	1	–	0,06		

¹ ВВ – взрывчатые вещества; ² ОВ – отравляющие вещества; ³ ОБУВ – ориентировочно безопасный уровень воздействия;

⁴ ГСМ – горюче-смазочные материалы

[¹ ВВ – explosives; ² ОВ – toxic substances; ³ ОБУВ – approximately safe level of exposure; ⁴ ГСМ – fuels and lubricants]

На действующих и законсервированных полигонах концентрации взрывчатых веществ, топлива и продуктов их трансформации в почвах в подавляющем большинстве случаев в сотни и тысячи раз превышают предельно допустимые концентрации [8, 11]. Через 30 лет

на территориях бывших военных баз в почвах на разной глубине обнаружены тяжелые металлы с концентрациями, многократно превышающими предельно допустимые (свинец до – 61 ПДК; кадмий – до 700 ПДК; цинк – до 12 ПДК, медь – до 2 ПДК, марганец – до 3 ПДК) [9].

Маркерами длительного загрязнения почв взрывчатыми веществами могут служить нитраты, так как они являются одними из продуктов сложного многоступенчатого распада большинства из них. Большинство детонаций во время ведения боевых действий, испытаний и учений являются высокоточными. При детонации различных снарядов, мин, ручных гранат большая часть взрывчатого вещества расходуется, а осаждается лишь от 10^{-3} до $10^{-6}\%$ от начальной массы взрывчатого вещества. Поэтому детонации высокого порядка не вносят существенного вклада в общие остатки на полигонах. Наибольшее загрязнение почв характерно для мест детонации боеприпасов низкого порядка [12,20].

Целью данной работы является исследование загрязнения почв типичного военного полигона тяжелыми металлами, полуметаллами, нитратным азотом для установления особенностей распределения загрязнителей по высоте воронок различного происхождения и времени образования, выделения приоритетных загрязнителей почв от взрывов боеприпасов, а также проведения интегральной оценки уровня загрязнения почв воронок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведена оценка загрязнения почв металлами, полуметаллами и нитратным азотом (маркер загрязнения почв взрывчатыми веществами) на типичном военном полигоне общего назначения, расположенном в Центральном федеральном округе. Изначально полигон создавался в интересах аэродрома государственной авиации, на нем испытывали неуправляемые авиационные средства поражения калибром до 500 кг. Впоследствии он стал использоваться как место проведения российских этапов состязаний «Авиадартс», масштабных артиллерийский и танковых учений. С весны 2010 года на полигоне проводили утилизацию снарядов, в том числе, полученных по ленд-лизу еще в годы Великой Отечественной войны.

Территориально полигон приурочен к Воронежской флювиогляциальной гряде – уникальному по размерам и происхождению образованию в западном секторе Донского ледникового языка, сформировавшегося на стадии отмирания краевого сегмента ледника [2]. Западный склон сложен песками мощностью до 80 м, к востоку они сменяются суглинками. По простиранию разлома в северо-восточном направлении сформировались кольцевые отрицательные структуры кратерного типа (циркумменты с поперечником более 1 км), окаймленные песчаным валом зонального сложения.

Полигон представляет собой участок, вытянутый по восточному склону флювиогляциального вала. Уклон от воронок имеет место также и в сторону циркуммента, от которого начинается балка Карпенчихин Лог с временным водотоком. Балка тянется до поселка Семилукские Выселки в устьевой части Воронежского водохранилища. Состояние почв неоднородно, что обусловлено различными видами военной деятельности, осуществляемых на полигоне общего назначения в течение длительного времени. Антропогенное нару-

шение рельефа вызвано главным образом образованием воронок от авиационных бомб, танковых снарядов, утилизации боеприпасов, а также созданием земляных валов, рвов. Все это приводит к интенсификации процессов дефляции и эрозии почв.

Преобладающий тип почв на участках полигона с ненарушенным рельефом – черноземы слабовыщелоченные. В точках отбора проб на поверхности воронок установлено высокое содержание (до 75 %) среднезернистого песка с диаметром частиц 0,25-0,05 мм и физической глины $< 20\%$. В приповерхностном слое почв на середине и дне воронок преобладает фракция с диаметром частиц 0,005-0,001 мм и содержанием физической глины $\sim 70-80\%$, что по классификации Н. А. Качинского соответствует глинам средним [1]. Показатель кислотности солевой вытяжки исследуемых почв $pH_{\text{ксл}}$ изменялся в интервале 6,6-7,2, то есть исследуемые почвы относятся к нейтральным и слабощелочным [5].

Отбор проб грунта осуществляли следующим образом: по 4 пробы отбирали на верхней кромке и середине высоты, а затем делали из них две смешанные пробы; одну точечную пробу отбирали на дне воронок. В воронке I (диаметр $d = 25$ м; глубина $h = 8$ м) проводили утилизацию боеприпасов. Воронки II ($d = 12$ м; $h = 6$ м) и III ($d = 10$ м; $h = 4$ м) образованы в результате сброса авиабомб. Отмечается мощный выброс грунта из воронки I на расстояние до 20 м от ее кромки. Воронка III образована в более ранний период времени, что следует из наличия растительности на ее стенках. Пробы почв отбирали в сухую погоду на глубине до 20 см.

Содержание загрязняющих почвы веществ определяли в лаборатории комплексных исследований на базе Воронежского государственного университета. Концентрации 22 элементов – методом рентгеновской спектрометрии с применением РФА S8 TIGER (методика определения трейсовых содержаний элементов в почвах, горных породах фирмы Bruker, Германия); нитратов – фотометрическим методом с салициловой кислотой.

Для загрязнителей с установленными значениями предельно и ориентировочно допустимых концентраций (ПДК и ОДК) рассчитывали коэффициент опасности K_{oi} – отношение фактической концентрации i -того загрязнителя к нормативу (табл. 2) [13].

Для интегральной оценки геоэкологической ситуации на полигоне устанавливали фоновые концентрации исследуемых загрязнителей почв. Проводили параллельный анализ проб приповерхностного слоя почв, отобранных в рекреационной зоне на расстоянии более 20 км от полигона и 7 км от других возможных источников выбросов (тип почвы – черноземы типичные, близкие по свойствам к черноземам выщелоченным). Интегральную оценку загрязнения приповерхностного слоя почв полигона проводили по суммарному показателю Z_c [13]:

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

Таблица 2

Предельно/ориентировочно допустимые концентрации (ПДК/ОДК) загрязнителей почв (мг/кг) и классы их опасности (валовое содержание)
[Table 2. Maximum/approximate permissible concentrations (standard) soil pollutants (mg/kg) and their hazard classes (gross content)]

Загрязнитель / The pollutant	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
ПДК/ОДК	—*	—	100,0**	0,05	1500	—	—	20; 80***
Класс опасности	—	—	3	2	3	—	—	2
Загрязнитель	Cu	Zn	Ba	Ga	As	Rb	Sr	Y
ПДК/ОДК	33; 132	55; 220	—	—	2,0; 10,0	—	—	—
Класс опасности	2	1	—	—	1	—	—	—
Загрязнитель	Zr	Nb	Sn	Sb	Cs	Pb	нитраты (по NO ₃ ⁻)	
ПДК/ОДК	—	—	—	4,5	—	32; 130	130	
Класс опасности	—	—	—	2	—	1	3	

* – норматив не установлен; ** – с учетом эффекта суммации; *** – ориентировочно допустимая концентрация для супесей (кромка воронки); суглинков (середина и дно воронки) соответственно
[* – the standard is not set; ** – taking into account the summation effect; *** – the approximate permissible concentration for sandy loam (edge of the funnel); loam (middle and bottom of the funnel), respectively]

где n – число исследуемых загрязнителей, $C_{факт\ i}$ и $C_{фон\ i}$ – фактическая и фоновая концентрации в почве i -того загрязнителя; $C_{факт\ i}/C_{фон\ i}$ – коэффициент концентрации (опасности).

Методики для оценки распределения уровня загрязнения почв по высоте воронок нет. Суммарный показатель загрязнения почв Z_c в этом случае невозможно рассчитать из-за отсутствия значений фоновых концентраций на различной глубине подобных незагрязненных грунтов. Поэтому для сравнительного анализа проводили нормировку концентраций каждого элемента в пробах, отобранных на кромке каждой во-

ронки, середине высоты и дне. Для этого рассчитывали соотношение концентрации i -того элемента в отдельной точке j -той воронки к его максимальному содержанию в почве этой же воронки: $C_{норм\ ij} = C_{ij}/C_{max\ ij}$. Строили усредненные зависимости вероятности P накопления элементов в точках профиля воронок. Вероятность накопления рассчитывали как соотношения числа проб с максимальной концентрацией ($C_{норм\ ij} = 1$) к общему числу исследуемых металлов в грунтах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фоновые концентрации исследуемых элементов в почвах представлены в таблице 3.

Таблица 3

Фоновые концентрации элементов ($C_{фон}$, мг/кг)
[Table 3. Background concentrations of elements (C_{bac} , mg/kg)]

Мет.	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ba
$C_{фон}$	2,5	0,45	41	7,2	202	3625	2,2	5,6	6,2	15	157
Мет.	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Sb	Cs	Pb
$C_{фон}$	0,042	2,6	16	19	8,7	41	0,61	0,55	0,99	1,8	2,1

Для всех элементов фоновые концентрации не превышают установленных нормативов, за исключением хрома. В пробах сравнения его содержание выше ПДК в 144 раза. Случаи превышения фоновых концентраций элементов установленных нормативов хорошо известны и являются одной из проблем нормирования качества почв и грунтов для различных регионов, в том числе по меди, ванадию, кадмию, хрому [10]. Фоновая концентрация нитратного азота составляла $0,0223 \pm 0,0089$ мг/кг, что в 6500 раз ниже установленного норматива.

Концентрационное распределение загрязнителей по высоте воронок с установленными ПДК/ОДК [13], приведено в таблице 4.

Нормативы, приведенные в таблице 2, превышены только по двум показателям – хрому (в 380-740 раз) и мышьяку (в 1,5 раза). Аномально высокое превышение

ПДК хрома объясняется его высокой фоновой концентрацией в исследуемых почвах. Хром относится к высоко опасным загрязнителям (II класс), поэтому уровень загрязнения почв по лимитирующему показателю можно оценивать, как «очень сильный». Мышьяк – чрезвычайно опасное вещество (I класс опасности), даже незначительное его превышение ОДК в почвах также относит их к рангу «очень сильно загрязненные» [13].

Суммарный показатель загрязнения почв с учетом фоновых концентраций загрязнителей возможно рассчитать только для кромок воронок, так как их фоновые концентрации на глубинах до 8 м определить не представляется возможным. Суммарный показатель загрязнения почвы на кромке первой воронки существенно отличается от двух воронок, образовавшихся в результате разрыва авиационного снаряда: I) 59,1; II) 35,1; III) 37,2.

Таблица 4

Распределение концентраций нормируемых загрязнителей почв по высоте воронок различной природы (мг/кг)
 [Table 4. Distribution of concentrations of normalized soil pollutants by the height of funnels of various nature]

Точка пробоотбора / Sampling point	Концентрация загрязнителя, мг/кг / Concentration of the pollutant, mg/kg								
	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Sb	Pb
Воронка I (утилизация боеприпасов) / Funnel I (ammunition disposal)									
Кромка	42	35	420	10	9	18	3	6	25
Середина высоты	45	42	710	12	9	21	3	6	27
Дно	43	41	400	15	17	19	4	5	23
Воронка II, новая (авиаснаряд) / Funnel II, new (aircraft)									
Кромка	31	31	630	14	7	16	2	5	18
Середина высоты	24	20	290	7	7	10	1	6	12
Дно	23	26	290	4	8	11	1	8	13
Воронка III, старая (авиаснаряд) / Funnel III, old (aircraft)									
Кромка	38	33	390	8	4	14	2	5	18
Середина высоты	17	15	200	15	5	8	н/о	7	8
Дно	21	19	190	7	6	9	н/о	6	11

Это вызвано тем, что в воронке I обнаружено 18 элементов, концентрации которых существенно превышают фоновые. Тогда как в II и III воронках их количество составляло 15, а концентрации по отдельным элементам (Fe, Cu, Zr, Sb, Cs) были незначительно выше фоновых. На поверхности всех воронок уровень загрязнения почв металлами соответствует рангу «опасное загрязнение».

Фактические концентрации изученных элементов в почве полигона имеют широкий разброс (могут отличаться в ~20 раз) и зависят от времени и причины образования воронок. На рисунке 1 представлены минимальные и максимальные на исследуемом участке полигона коэффициенты концентрации элементов.

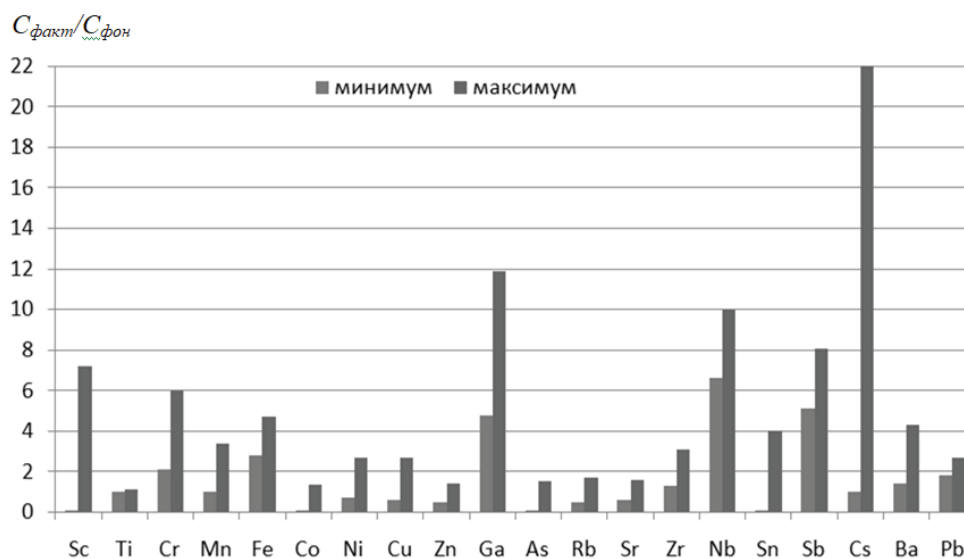


Рис. 1. Кратность превышения фоновых концентраций изученных элементов в приповерхностном слое почв на военном полигоне
 [Fig. 1. The multiplicity of exceeding the background concentrations of the studied elements in the near-surface layer of soils at a military training ground]

Значительные превышения фоновых концентраций характерны для цезия, галлия, ниобия, сурьмы и скандия, которые применяются в военном деле для производства авиационных сплавов, управляемых снарядов, броневых сердечников, микроэлектронных схем, взрывчатых веществ. Сведений об их содержании в почвах полигонов (и других объектов военной деятельности) в литературе нет, перечисленные элементы на сегодняшний день не относят к приоритетным загрязнителям объектов

военной деятельности. Однако уже установлено негативное влияние на организм человека некоторых из них, выявлены профессиональные заболевания при контакте с самими элементами и их солями [18].

Результаты статистической обработки содержания металлов в почвах по высоте воронок приведены на рисунке 2.

В воронках II и III (от авиационных снарядов) максимальное содержание большинства исследован-

ных элементов (с вероятностью 74 и 78 %) обнаружено на кромке. Исключение составляют Cs, Sb, Sn, которые в этих воронках сконцентрированы на половине высоты или дне. Cu и Pb практически равномерно

распределены по высоте воронок. Схожие распределения можно объяснить тем, что элементы выносятся на поверхность грунтов взрывной волной и оседают вблизи воронок.

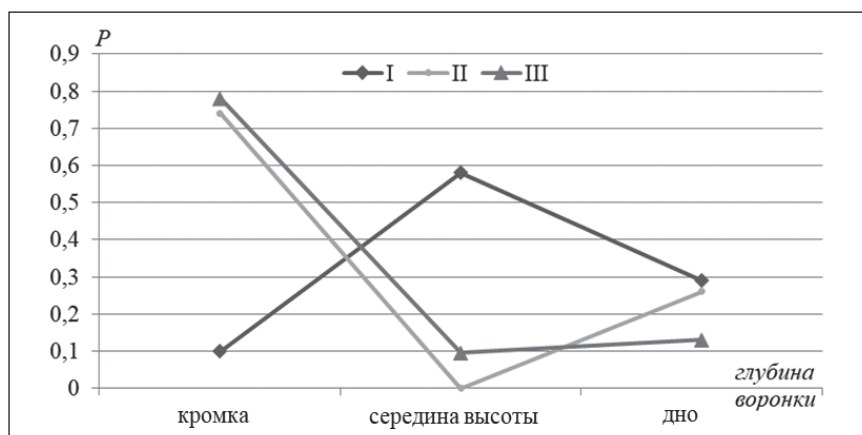


Рис. 2. Нормированные вероятности содержания элементов по профилю воронок I-III
[Fig. 2. Normalized probabilities of the content of elements according to the profile of funnels I-III]

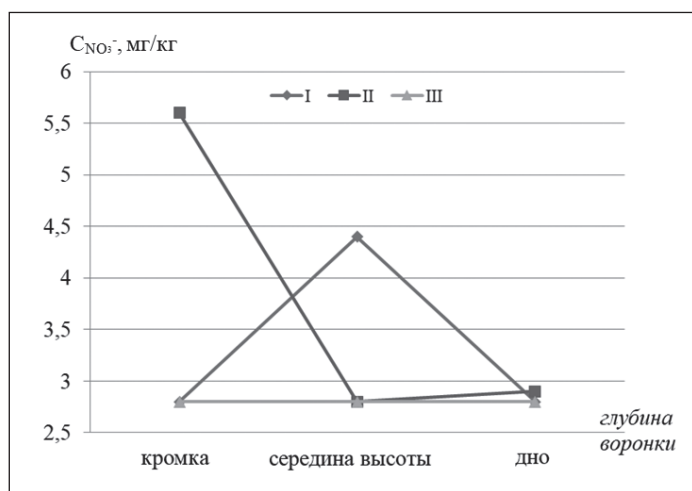


Рис. 3. Концентрации нитратного азота по высоте воронок I-III
[Fig. 3. Nitrate nitrogen concentrations by funnel height I-III]

В воронке I наблюдается иная картина распределения содержания элементов: концентрационный максимум установлен на середине высоты воронки в 58 % случаев, на кромке зафиксированы максимумы концентраций только для Ga и Zr. Предположительно, мощная взрывная волна при утилизации боеприпасов переносит загрязняющие вещества дальше от места подрыва. Об этом свидетельствуют глыбы грунта, разбросанные в радиусе 20 м от воронки. На дне этой воронки установлены относительно высокие концентрации Fe, Ni, Cu, As, Sn, Cs. Надо отметить, что здесь же находится большое количество тяжелых осколков боеприпасов.

Распределение концентраций нитратного азота по высоте воронок аналогично распределению изученных элементов (рис. 3). За исключением воронки III, в которой концентрация нитратов по всей высоте распределена равномерно в минимальном количестве из установленных на полигоне. ПДК нитратного азота не превышена ни в

одной из точек отбора, при этом коэффициент концентрации на кромке воронок $K_k = 127 - 255$; максимум зафиксирован на поверхности свежей воронки от авиаснаряда.

Расхождение вероятностей загрязнения профилей воронок можно объяснить различными типами взрывов, приведших к образованию воронок. В самой глубокой воронке I, где производилась утилизация боеприпасов, взрывы по своей сути были подземными. В воронках II и III – надземными, причем самая неглубокая воронка III образовалась в результате взрыва меньшей мощности, чем воронка II.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье отражены проблемы загрязнения почв военных объектов на примере типичного полигона общего назначения в Центральном федеральном округе. Несмотря на масштабы загрязнения, в нашей стране уделено этой проблеме недостаточное внимание. В литературе практически отсутствуют данные об исследованиях

распространения и накопления токсикантов в депонирующих средах полигонов, которые занимают огромные территории и в перспективе должны быть использованы в гражданских нуждах (сельскохозяйственные угодья, селитебные и рекреационные зоны).

Развернутый химический анализ почв воронок от утилизации боеприпасов и авиаснарядов по 22 элементам показал превышение установленных нормативов по мышьяку и хрому (элементы I и II классов опасности). Вместе с тем, отмечено высокое фоновое содержание хрома в почвах исследуемой территории, которое в 144 раза превышает ПДК. В соответствии с коэффициентами опасности, уровень загрязнения почв этими элементами соответствует рангу «очень сильно загрязненные».

Максимально высокие коэффициенты концентрации загрязняющих элементов зафиксированы на кромке воронки для утилизации боеприпасов для цезия, галлия, ниобия, сурьмы и скандия: $K_K(\text{Cs}) = 22$; $K_K(\text{Ga}) = 12$; $K_K(\text{Nb}) = 10$; $K_K(\text{Sb}) = 8$; $K_K(\text{Sc}) = 7,7$. Эти элементы ранее не были изучены как загрязнители почв объектов военной деятельности, их концентрации в почвах на сегодняшний день не нормируются, но есть сведения об их необратимом негативном воздействии на организм человека.

Суммарный показатель загрязнения почв, рассчитанный с учетом коэффициентов концентрации исследуемых загрязнителей, для воронок различной природы, соответствует рангу «опасное загрязнение». Суммарный показатель загрязнения почв кромки воронки, образованной при утилизации снарядов, $\sim 1,7$ раз превышает Z_c кромок воронок от авиаснарядов. Несмотря на разное время образования изученных воронок, суммарные показатели загрязнения почв практически не различаются, что соответствует данным о длительной саморегенерации почв, загрязненных металлами.

Предельно допустимая концентрация нитратного азота (как маркера долгосрочного загрязнения почв взрывчатыми веществами) не превышена ни в одной из точек пробоотбора, что свидетельствует о его высокой миграционной способности. Максимальная его концентрация была зафиксирована на кромке новой воронки от авиаснаряда $K_K(\text{NO}_3^-) = 255$. В старой воронке обнаружены равномерно распределенные по высоте минимальные для полигона концентрации NO_3^- ($\sim 2,8$ мг/кг). В воронке от утилизации боеприпасов, также, как и в случае с металлами, самая высокая концентрация нитратного азота была определена на середине ее высоты ($\sim 4,4$ мг/кг).

Распределение загрязнения по профилю воронок связано с типами взрывов. При подземном взрыве максимум загрязнения наблюдается в средней части профиля воронки. При надземных взрывах на ее кромке.

Закономерности накопления взрывчатых веществ и продуктов их трансформации в почвах объектов военной деятельности требуют дополнительного исследования. В связи с обострившимися вооруженными конфликтами во всем мире надо учитывать, что рано или поздно появится острая необходимость объектив-

ной оценки деградации почв для последующей разработки рекомендаций по их рекультивации и возможности использования в гражданских целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. *Методы исследования физических свойств почв*. Москва: Агропромиздат, 1986. 416 с.
2. Глушков Б. В. Геология отложений ледникового комплекса Донского ледникового языка // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*, 2011, № 2, с. 40-48.
3. Дабахов М. В., Дабахова Е. В., Титова В. И. *Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования*. Нижний Новгород: Издательство ВВАГС, 2005. 165 с.
4. Деградация почв в районе военных объектов и ОПК / А. В. Ситникова, Е. Н. Трошина, В. И. Пеков, Е. Б. Николаева // *Вестник академии военных наук*, 2008, № 3 (24). – URL: <http://militaryarticle.ru/vestnik-akademii-voennykh-nauk/2008-vavn/10765-degradacija-pochv-v-raione-voennyh-obektov-i-opk> (дата обращения: 07.11.2023). – Текст: электронный.
5. Добровольский В. В. *География почв с основами почвоведения*. Москва: Наука, 1989, с. 79-80.
6. Клепиков О. В., Куропат С. А. Обоснование выбора точек контроля для оценки воздействия аэротехнических загрязнений на личный состав авиационных частей и подразделений // *Тенденции развития науки и образования*, 2020, № 58-1, с. 46-48.
7. Кочетова Ж. Ю., Базарский О. В., Пантелеев Д. А. *Экология почв военных полигонов*. Воронеж: Научная книга, 2023. 184 с.
8. Кочетова Ж. Ю. Авиационно-ракетный кластер как новый класс объектов геоэкологического мониторинга // *Географический вестник*, 2019, № 3 (50), с. 79-91.
9. Кочетова Ж. Ю., Маслова Н. В., Базарский О. В. *Авиационно-ракетные кластеры и окружающая среда*. Москва: Инфра-М, 2022. 266 с.
10. Лисов О. Экологическая безопасность при утилизации БВТ // *Обозреватель – Observer*, 2004, № 12 (179). – URL: <http://militaryarticle.ru/obozrevatel/2004-obozrevatel/13492-jekologicheskaja-bezopasnost-pri-utilizacii-bvt> (дата обращения: 07.11.2023). – Текст: электронный.
11. *Международная кампания по запрещению наземных мин. Мониторинг наземных мин и кассетных боеприпасов. Вьетнам 2002*. – URL: <http://archives.themonitor.org/index.php/publications/display?url=lm/2003/vietnam.html> (дата обращения: 07.11.2023). – Текст: электронный.
12. Панов К. Н., Комрачков В. А. Исследование рентгенографическим методом эволюции профиля плотности вещества за фронтом расходящейся ударной волны во взрывчатом веществе // *Физика горения и взрыва*, 2004, т. 40, № 5, с. 102-108.
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, 635 с.
14. Смурыгин А. В., Бакин Э. Н., Асеев В. А. Особенности экологического обеспечения в Вооруженных Силах Российской Федерации // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*, 2019, т. 1, № 10, с. 393-395.
15. Техногенная трансформация экологических функций абиотических сфер Земли под влиянием военной деятельности / В. Т. Трофимов, М. А. Харьковина, А. Д. Жигалин, Т. А. Барабошкина // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*, 2019, № 1, с. 3-13.
16. Хусаинова Р. З., Чуйков Ю. С. Проблемы экологической безопасности и безопасности персонала и населения при утилизации непригодных к использованию боеприпасов. Обзор // *Астраханский вестник экологического образования*, 2013, № 2 (24), с. 156-169

17. Цинк и ртуть в почвах и растениях техногенно загрязненных территорий (на примере Яворовского военного полигона и территории завода «Радикал») / Н.О. Крюченко, Э.Я. Жовинский, Э.В. Панаит, Е.А. Андриевская // *ScienceRise*, 2015, т. 7, № 1 (12), с. 18-23.

18. Чертко Н.К., Чертко Э.Н. *Геохимия и экология химических элементов: справочное пособие*. Минск: Издательский центр БГУ, 2008. 140 с.

19. Jenkins T.F., Pennington J.C., Ampleman G. *Characterization and fate of gun and rocket propellant residues on testing and training ranges: interim report* / Tech. Rep. ERDC TR-07-01, Strategic Environmental Research and Development Program, Vicksburg, Miss, USA, 2007.

20. Kochetova Z. Y., 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, no. 13, p. 2990-2996.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 12.01.2024

Принята к публикации: 02.12.2024

UDC 504.45 (470.324)

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/164-173>

Geoecological Assessment of Soil Contamination at a General-Purpose Military Training Area

D.A. Panteleyev¹ ✉, Zh. Yu. Kochetova¹, O. V. Bazarskiy¹,
V. P. Zakusilov¹, V. N. Nechaev¹, A. N. Larionov²

¹*Air Force Academy named after Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin,
Russian Federation*

(54a, Stary Bolshevnikov str., Voronezh, 394064)

²*Voronezh State Agrarian University named after the Emperor Peter I, Russian Federation
(1, Michurin str., Voronezh, 394087)*

Abstract. The purpose is to study the patterns of soil contamination in craters of various origin and time of formation at a general-purpose military training area.

Materials and methods. A detailed chemical analysis of soils selected from craters of various origin and time of formation on the territory of a typical general-purpose military area in the Central Federal District was carried out. The content of 22 elements was estimated by X-ray spectrometry. The content of nitrate nitrogen was estimated by potentiometry. The probability of soil contamination in the height of craters depending on their nature and age of formation was calculated.

Results and discussion. Background concentrations of 22 metals and semi-metals, as well as nitrate nitrogen were determined. For all the studied contaminants of the military training area soils background concentrations do not exceed the established standards, with the exception of chromium. The concentration distribution of contaminants along the height of the craters formed during the dropping of aviation bombs and as a result of the disposal of ammunition by detonation method differs significantly. Exceeding the established standards of elements in soils was revealed for arsenic and chromium. Significant excess of background concentrations is typical for caesium, gallium, niobium, antimony and scandium. The maximum permissible concentration of nitrate nitrogen is not exceeded at any of the sampling points, while the maximum of its content is fixed on the surface of a fresh crater from an aerial bomb.

Conclusion. Soil contamination at military ranges is characterised by high non-uniformity both on the surface and in terms of craters height. The diversity of materials and substances used in military activities requires a more detailed study of soil contamination of military ranges of different purposes in order to identify priority pollutants and to develop unified methods for assessing the contamination of large-scale areas.

Key words: military ecology, soil contamination, military training areas, metals, semi-metals, nitrates, ammunition disposal, craters.

For citation: Pantelev D.A., Kochetova Zh. Yu., Bazarsky O. V., Zakusilov V. P., Nechaev V. N., Larionov A. N. Geoecological Assessment of Soil Contamination at a General-Purpose Military Training Area. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografia. Geoekologia*, 2024, no. 4, pp. 164-173 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/164-173>

REFERENCES

1. Vadyunina A. F., Korchagina Z. A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* [Methods of investigation of physical properties of soils]. Moscow: Agropromizdat, 1986. 416 p. (In Russ.)

2. Glushkov B. V. *Geologiya otlozhenij lednikovogo kompleksa Donskogo lednikovogo yazyka* [Geology of deposits of the glacial complex of the Don glacial tongue]. *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya*, 2011, no. 2, pp. 40-48. (In Russ.)

© Pantelev D.A., Kochetova Zh. Yu., Bazarsky O. V., Zakusilov V. P., Nechaev V. N., Larionov A. N., 2024

✉ Dmitry A. Pantelev, e-mail: dmitryipantelev@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

3. Dabahov M. V., Dabahova E. V., Titova V. I. *Tyazhelye metall: ekotoksikologiya i problemy normirovaniya* [Heavy metals: ecotoxicology and problems of rationing]. Nizhny Novgorod: Izdatel'stvo VVAGS, 2005. 165 p. (In Russ.)
4. Degradatsiya pochv v rajone voennykh ob'ektov i OPK [Soil degradation in the area of military facilities and defense industry] / A. V. Sitnikova, E. N. Troshina, V. I. Pekov, E. B. Nikolaeva. *Vestnik akademii voennykh nauk*, 2008, no. 3 (24). – URL: <http://militaryarticle.ru/vestnik-akademii-voennykh-nauk/2008-vavn/10765-degradatsiya-pochv-v-rajone-voennykh-obektov-i-opk> (accessed 07.11.2023). – Text: electronic. (In Russ.)
5. Dobrovolskiy V. V. *Geografiya pochv s osnovami pochvovedeniya* [Geography of soils with the basics of soil science]. Moscow: Nauka, 1989, pp. 79-80. (In Russ.)
6. Klepikov O. V., Kurolap S. A. Obosnovanie vybora tochek kontrolya dlya ocenki vozdeystviya aerotekhnicheskikh zagryazneniy na lichnyy sostav aviacionnykh chastey i podrazdeleniy [Justification of the choice of control points for assessing the impact of aerotechnical pollution on the personnel of aviation units and subdivisions]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2020, no. 58-1, pp. 46-48. (In Russ.)
7. Kochetova Zh. Yu., Bazarskiy O. V., Pantelev D. A. *Ekologiya pochv voennykh poligonov* [Soil ecology of military ranges]. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2023. 184 p. (In Russ.)
8. Kochetova Zh. Yu. Aviacionno-raketnyy klaster kak novyy klass ob'ektov geoeologicheskogo monitoringa [Aviation-rock-et cluster as a new class of objects of geoeological monitoring]. *Geograficheskij vestnik*, 2019, no. 3 (50), pp. 79-91. (In Russ.)
9. Kochetova Zh. Yu., Maslova N. V., Bazarskiy O. V. *Aviacionno-raketnye klastery i okruzhayushchaya sreda* [Aviation-missile clusters and the environment]. Moscow: Infra-M, 2022. 266 p. (In Russ.)
10. Lisov O. *Ekologicheskaya bezopasnost' pri utilizatsii VVT* [Environmental safety during the disposal of military equipment]. *Obozreva-tel' – Observer*, 2004, no. 12 (179). – URL: <http://militaryarticle.ru/obozrevatel/2004-obozrevatel/13492-jekologicheskaja-bezopasnost-pri-utilizatsii-vvt> (accessed 07.11.2023). – Text: electronic. (In Russ.)
11. *International campaign to ban landmines. Monitoring of landmines and cluster munitions. Vietnam 2002*. – URL: <http://archives.themonitor.org/index.php/publications/display?url=lm/2003/vietnam.html> (accessed 07.11.2023). – Text: electronic. (In Russ.)
12. Panov K. N., Komrachkov V. A. Issledovanie rentgenograficheskim metodom evolyucii profilya plotnosti veshchestva za frontom raskhodyashchey udarnoy volny vo vzryvchatom veshchestve [Investigation by the X-ray method of the evolution of the density profile of matter behind the front of a divergent shock wave in an explosive substance]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2004, vol. 40, no. 5, pp. 102-108. (In Russ.)
13. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Postanovlenie glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021 g., no. 2, 635 p. (In Russ.)
14. Smurygin A. V., Bakin E. N., Aseev V. A. Osobennosti ekologicheskogo obespecheniya v Vooruzhennykh Silakh Rossijskoj Federacii [Features of environmental support in the Armed Forces of the Russian Federation]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*, 2019, vol. 1, no. 10, pp. 393-395. (In Russ.)
15. Tekhnogennaya transformatsiya ekologicheskikh funk-cij abioticheskikh sfer Zemli pod vliyaniem voennoj deyatel'nosti [Technogenic transformation of ecological functions of abiotic spheres of the Earth under the influence of military activity] / V. T. Trofimov, M. A. Har'kina, A. D. Zhigalin, T. A. Baraboshkina. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya*, 2019, no. 1, pp. 3-13. (In Russ.)
16. Husainova R. Z., Chujkov Yu. S. Problemy ekologicheskoy bezopasnosti i bezopasnosti personala i naseleniya pri utilizatsii neprigodnykh k ispol'zovaniyu boepripasov. Obzor [Problems of environmental safety and the safety of personnel and the public during the disposal of unusable ammunition. Review]. *Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2013, no. 2(24), pp. 156-169. (In Russ.)
17. Cink i rtut' v pochvah i rasteniyah tekhnogenno zagryaznennykh territorij (na primere Yavorovskogo voennogo poligona i territorii zavoda «Radikal») [Zinc and mercury in soils and plants of technogenically polluted territories (on the example of the Yavorovsky military training ground and the territory of the Radical plant)] / N. O. Kryuchenko, E. Ya. Zhovinskij, E. V. Panait, E. A. Andrievskaya. *ScienceRise*, 2015, vol. 7, no. 1 (12), pp. 18-23. (In Russ.)
18. Chertko N. K., Chertko E. N. *Geohimiya i ekologiya himicheskikh elementov: spravocnoe posobie* [Geochemistry and ecology of chemical elements: a reference manual]. Minsk: Izdatel'skij centr BGU, 2008. 140 p. (In Russ.)
19. Jenkins T. F., Pennington J. C., Ampleman G. *Characterization and fate of gun and rocket propellant residues on testing and training ranges: interim report* / Tech. Rep. ERDC TR-07-01, Strategic Environmental Research and Development Program, Vicksburg, Miss, USA, 2007.
20. Kochetova Z. Y., Bazarskiy 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, no. 13, pp. 2990-2996.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 12.01.2024

Accepted: 02.12.2024

Пантелеев Дмитрий Александрович
Старший помощник начальника центра организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: dmitriypantelev@mail.ru.

Кочетова Жанна Юрьевна
Доктор географических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации и ремонта средств аэродромно-технического обеспечения полетов ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-8838-9548, e-mail: zk_vva@mail.ru.

Dmitry A. Pantelev
Senior assistant to the head of the centre for the organization of scientific work and training of scientific and pedagogical personnel Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation, e-mail: dmitriypantelev@mail.ru.

Zhanna Yu. Kochetova
Dr. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. at the Department of Operation and Repair of Aerodrome and Technical Support of Flights of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-8838-9548, e-mail: zk_vva@mail.ru.

Базарский Олег Владимирович

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и химии ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-2851-716X, e-mail: arhangelskaya49@mail.ru.

Закусилов Вадим Павлович

Кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры гидрометеорологического обеспечения ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: zakusilov04@yandex.ru

Нечаев Владимир Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: wladnic@mail.ru

Ларионов Алексей Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: larionovan@yandex.ru.

Oleg V. Bazarsky

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Prof. at the Department of Physics and Chemistry of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2851-716X, e-mail: arhangelskaya49@mail.ru.

Vadim P. Zakusilov

Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Assoc. Prof. at the Department of Physics and Chemistry of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation, e-mail: zakusilov04@yandex.ru

Vladimir N. Nechaev

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Prof. at the Department of Mathematics of the Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation

Alexey N. Larionov

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof. at the Department of Mathematics and Physics of the Voronezh State Agrarian University named after the Emperor Peter I, Voronezh, Russian Federation, e-mail: larionovan@yandex.ru