



УДК 504.064.2

DOI 10.52575/2712-7443-2023-47-4-607-618

## Методика картирования загрязнения почв военных полигонов со значительно измененным рельефом

**Пантелеев Д.А., Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю.**

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А

E-mail: dmitryipantelev@mail.ru, arhangelskaya49@mail.ru, zk\_vva@mail.ru

**Аннотация.** К экологически опасным последствиям военной деятельности, длительное время сохраняющимся в литосфере, относятся нарушение естественного рельефа и химическое загрязнение почв. Этой проблеме в нашей стране до настоящего времени уделялось недостаточное внимание по нескольким причинам. С одной стороны, отсутствовал запрос общества и ответственных органов власти на решение экологических проблем, вызванных военной деятельностью, с другой, – секретность военных баз, полигонов и недостаточное количество специалистов, имеющих возможность проводить систематические исследования и устранять их последствия на военных объектах. В статье предложена методика оценки и картирования состояния почв полигонов и мест ведения активных боевых действий, отличающаяся от известных тем, что в ней оценивается значительное изменение рельефа в результате взрывов и неравномерное химическое загрязнение почв, а также относительно масштабные территории, подвергшиеся изменениям. В основе разработанной методики лежит статистический анализ деградации рельефа полигона и химического загрязнения почв. Показана высокая теснота связи между количеством воронок от взрывов на единице площади исследуемой территории (пикселе) с уровнем трехмерного химического загрязнения почв. Методика апробирована на участке типичного военного полигона общего назначения в Центральном федеральном округе, для которого построена цифровая карта химического загрязнения.

**Ключевые слова:** военная экология, военные полигоны, деградация рельефа, загрязнение почв, картирование, цифровые карты, воронки от взрывов, тяжелые металлы

**Для цитирования:** Пантелеев Д.А., Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю. 2023. Методика картирования загрязнения почв военных полигонов со значительно измененным рельефом. Региональные геосистемы, 47(4): 607–618 . DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-607-618

---

## Methodology for Mapping Soil Contamination of Military Landfills with Significantly Altered Terrain

**Dmitry A. Pantelev, Oleg V. Bazarsky, Zhanna Yu. Kochetova**

Military Educational and Scientific Center Air Force

«N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy»

54A Starykh Bol'shevikov St, Voronezh 494064, Russia

E-mail: dmitryipantelev@mail.ru, arhangelskaya49@mail.ru, zk\_vva@mail.ru

**Abstract.** The environmentally dangerous consequences of military activity, which can persist in the lithosphere for decades, include the violation of natural relief and chemical contamination of soils. Until now, insufficient attention has been paid to this problem in Russia for several reasons. On the one hand, there was no demand of society and responsible authorities to solve environmental problems caused by military activities. On the other hand, it is the secrecy of military bases, landfills and an insufficient number of specialists who have the opportunity to conduct systematic research and eliminate their consequences at closed military facilities. The article proposes a methodology for assessing and mapping the soil condition of



polygons and places of active hostilities. This technique differs from the known methods in that it evaluates a significant change in terrain as a result of explosions and uneven chemical contamination of soils, as well as large-scale territories. The developed methodology is based on a statistical analysis of the degradation of the landfill relief and its chemical contamination of soils. The pollution of the aviation part of the landfill is three-dimensional due to the depth of the craters, which determines a very high level of chemical contamination of soils. A high closeness of the relationship between the number of craters from explosions per unit area of the studied territory (pixel) and the level of three-dimensional chemical contamination of soils has been established. The technique was tested on the site of a typical general-purpose military training ground in the Central Federal District. According to the average total indicator of soil pollution in one averaged funnel and the density of funnels in each pixel, a digital map of soil degradation of the studied military training ground was built. The map shows the most polluted areas that need to be decommissioned and areas that can still be used for civilian purposes.

**Keywords:** military ecology, military ranges, terrain degradation, soil pollution, mapping, digital maps, blast craters, heavy metals

**For citation:** Panteleev D.A., Bazarsky O.V., Kochetova Zh.Yu. 2023. Methodology for Mapping of Soil Contamination of Military Landfills with Significantly Altered Terrain. *Regional geosystems*, 47(4): 607–618. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-607-618

## Введение

Военная деятельность существенным образом затрагивает почвенные ресурсы [Трофимов и др., 2019]. Площадь территорий, принадлежащих военным ведомствам и не используемых для других целей в силу секретности и опасности объектов, по разным данным оценивается в 750 тыс. – 1,5 млн км<sup>2</sup>. Под военные базы и формирования заняты значительные территории от общей площади различных стран (например, до 16,75 % в Белоруссии) [Кудельский и др., 1997]. В Западной Европе в военных целях используют от 1 до 3 % территории, еще более значительная часть ощущает на себе косвенное или временное воздействие со стороны вооруженных сил [Трофимов и др., 2014]. Во многих случаях это лесные массивы, плодородные земли и пастбища, изъятие которых из сферы промышленного и сельскохозяйственного производства отрицательно сказывается на общем экономическом потенциале государства и жизненном уровне населения.

Причина обострения военно-экологических проблем – создание оружия, способного причинять природе такой вред, который превышает ее возможности по самовосстановлению. XX и XXI века печально известны событиями, связанными с нанесением значительного экологического ущерба в ходе военных действий территориям многих государств. Достаточно вспомнить экологические последствия Великой Отечественной войны [Валеев, 2012], бомбардировки Хиросимы и Нагасаки [Пархитко, 2016; Трофимов и др., 2019], войны в Индокитае [Андреев, 2016], Персидском заливе [Манукян, 2009], бывшей Югославии [Новиков, 2011], Афганистане [Окимбеков, 2015], Ираке [Аль Сабунчи, Аль Сабунчи, 2009], Сирии [Kelley et al., 2015], военной операции на Украине [Василюк, 2022]. Объединив потенциал науки, техники и экономики, современное общество направило огромную часть сил и средств на уничтожение противника и разрушение окружающей среды.

Новые типы взрывчатых веществ дают взрывы огромной мощности, пушки стреляют под большим углом и с большей дальностью, снаряды падают на землю, глубоко проникая в почву. Дальнобойность орудий увеличилась настолько, что они стали стрелять по невидимой цели. Неминуемое увеличение рассеивания снарядов приводит к стрельбе не сообразно целям, а сообразно площадям. В связи с изменением боевых порядков войск на смену разрывным бомбам гладкоствольных орудий пришли шрапнель и гранаты (артиллерийские, ручные, винтовочные и др.). Обычные фугасы дают огромное количество

осколков, что является дополнительным поражающим фактором, губящим не только врага, но и природу. Авиационные бомбы также имеют большое рассеивание и проникают в почву глубже, чем артиллерийские снаряды того же веса. Каждый кг взрывчатого вещества обычной бомбы вызывает разрушение экосистемы на площади 12,5 м<sup>2</sup>. Размеры воронок, образуемых авиационными бомбами, зависят от глубины взрыва и состава пород в приповерхностной зоне. При взрыве бомбы мощностью 3 т в тротиловом эквиваленте размеры воронок в супесях и суглинках составляют 3 м в глубину и 25 м в диаметре, в вулканическом песке – 7 м в глубину и 20 м в диаметре, в торфах – 15 м в глубину и 5 м в диаметре [Кочетова и др., 2023]. В работе [Адушкин, Христофоров, 2004] представлены некоторые результаты исследований параметров воронок при крупномасштабных наземных взрывах, проведенных на различных испытательных полигонах. Мощность и плотность взрывов современных боеприпасов такова, что высокоточные удары по технической инфраструктуре приводят к значительным экологическим последствиям на масштабных территориях.

Загрязнение почв взрывчатыми веществами и составными компонентами топлив на производственных площадках, в зонах конфликтов и на военных полигонах является международной проблемой. Только в США тысячи военных объектов перечислены как загрязненные энергетическими соединениями [Martel et al., 2009]. Около 50 млн акров пострадали от бомбардировок и других учебных мероприятий. Еще большее число загрязненных участков существует в Европе и Азии [Kalderis et al., 2011]. Чрезвычайные ситуации в области общественного здравоохранения, тесно связанные с загрязнением прилегающих к полигонам территорий, вызвали требования местных граждан о принятии мер по восстановлению почв [Eriksson et al., 2004]. В течение последних двух десятилетий многочисленные организации эоактивистов вынудили военные ведомства в США, Канаде и многих европейских и азиатских странах выявлять места повышенного загрязнения и оценивать влияние военной деятельности на качество почв, подземных и поверхностных вод. Результаты проведенных исследований находятся в открытом доступе в Интернет. Этой проблеме начинают уделять внимание и в нашей стране [Смурыгин и др., 2019]. Есть разрозненные данные о содержании в почвах военных полигонов и аэродромов тяжелых металлов, нефтепродуктов, нитратного азота [Крюченко и др., 2015; Кочетова и др., 2017; Kochetova и др., 2018; Иванец и др., 2019]. В средствах массовой информации РФ появляется все больше откликов граждан на ухудшение экологической ситуации в районах действующих военных полигонов, о чем подробно рассказано в статье [Хусаинова, Чуйков, 2013].

Обширные территории и природные комплексы во всем мире подвержены деградации рельефа, загрязнены высокотоксичными веществами различного происхождения, уровень которых остается экологически опасным на протяжении десятков лет, что не позволяет их хозяйственное использование без дорогостоящих восстановительных работ и экологической реабилитации. Несмотря на это, до сих пор отсутствует единый подход к оценке экологической ситуации, учитывающий неравномерность вертикального и горизонтального загрязнения почв объектов военной деятельности и масштабы загрязненных земель.

Целью этой работы является создание экономической методики геохимического картирования военных полигонов и территорий ведения боевых действий с трехмерным загрязнением приповерхностной части литосферы и ее апробация на типичном военном полигоне общего назначения.

### **Объекты и методы исследования**

Военный полигон общего назначения расположен в пригороде Воронежа. Общая площадь полигона составляет 300 га. Участок полигона с наибольшей деградацией рельефа предназначен для отработки применения авиационных средств поражения и занимает площадь около 36 га. Полигон расположен в междуречье рек Воронеж и Дон, в средней



его части проходит водораздел. Грунт полигона в воронках – мелкозернистый песок, характеризующийся низкой устойчивостью по склонам; на ненарушенных участках полигона – выщелоченный чернозем [Кочетова и др., 2022].

Отбор проб на ненарушенных ровных участках авиационной части полигона и на расстоянии ~11 км от антропогенных источников проводили в соответствии с требованиями ГОСТ методом конверта со сторонами 10 м [ГОСТ 17.4.4.02-2017, 2017]. В воронках загрязнение почв по высоте неоднородно и зависит в основном от природы и давности их образования [Пантелеев и др., 2022]. Поэтому в воронках отбирали девять проб: одну – со дна воронки, по четыре – с противоположных сторон середины высоты склона воронки и ее кромки. Точечные пробы смешивали в одну объединенную, которую анализировали на содержание 22 элементов в сертифицированной лаборатории на базе Воронежского государственного университета методом рентгеновской спектрометрии. Погрешность при определении химического состава проб в лаборатории оценивали согласно стандарту отрасли [ОСТ 41-08-212-04, 2004].

Для интегральной оценки уровня загрязнения почв полигона в точке пробоотбора рассчитывали суммарный показатель  $Z_c$  [СанПиН 2.1.3684-21, 2021]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_{xi} - (n - 1), \quad (1)$$

где  $K_x$  – коэффициент концентрации (опасности химического загрязнения)  $i$ -того загрязняющего вещества – отношение его фактической концентрации к фоновой ( $K_x = C_i/C_{фонi}$ ),  $n$  – число загрязняющих веществ с  $K_x > 1$ . При  $Z_c < 16$  уровень загрязнения почв считается допустимым;  $16 \leq Z_c < 32$  – умеренно опасным;  $32 \leq Z_c < 128$  – опасным;  $Z_c \geq 128$  – чрезвычайно опасным. В этой работе для более точной классификации загрязненных зон полигона введен промежуточный ранг – очень опасный уровень ( $64 \leq Z_c < 128$ ).

Деграцию рельефа на авиационном участке полигона исследовали фотографированием местности с высоты 1710 м; разрешение фотоаппарата 25 см. Обработку снимков проводили с применением специального программного обеспечения Agisoft Metashape Professional, которое позволяет измерять диаметр, глубину и количество воронок на единицу площади.

Статистический анализ деграции рельефа полигона проводили по коэффициенту опасности  $K_{ди}$ . Он определяется как соотношение измеренного по аэрофотоснимку диаметра  $i$ -той воронки  $D_i$  к фоновому значению диаметра природных мелкомасштабных неоднородностей  $D_{фон} = 2$  м [Базарский и др., 2022]. По аналогии с коэффициентом опасности химического загрязнения в разработанной методике учитывали только те неровности рельефа, для которых  $K_{ди} > 1$ .

### Результаты и их обсуждение

Авиационную часть полигона разбивали на отдельные участки-пиксели, площадь которых зависит от плотности неоднородностей (воронок) и их среднего диаметра. Для авиационного полигона рекомендуемая площадь пикселя составляет 1 га. С помощью программы в каждом пикселе рассчитывали число воронок и анализировали их геометрические параметры. Проводили статистическую обработку результатов 362 измерений геометрических параметров воронок и строили таблицу коэффициентов опасности деграции воронок по мере их возрастания. Рассчитывали средневзвешенное значение (математическое ожидание величины), которое показывает наиболее вероятный диаметр воронки на исследуемой территории ( $D_{cp}$ ). По результатам расчетов выделяли «эталонную» воронку полигона со средневзвешенным диаметром  $D_{cp} = 12,2$  м. В ней отбирали пробы почвы по изложенной методике для проведения химического анализа. Установлены 15 элементов с  $K_x > 1$ , которые учитывали для дальнейших расчетов [Пантелеев и др., 2022]. Условно-естественные (фоновые) концентрации исследуемых металлов в почвах представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1Условно-естественные концентрации металлов ( $C_{фон}$ , мг/кг)  
Conditionally natural concentrations of metals ( $C_{фон}$ , mg/kg)

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

Фактические концентрации металлов в почве полигона имеют широкий разброс (могут отличаться в  $\sim 20$  раз) и зависят от времени и причины образования воронок (авиационные, артиллерийские снаряды, утилизация боеприпасов). Надо отметить, что значительное превышение фоновой концентрации характерно для цезия, галлия, ниобия и скандия, которые применяются в военном деле, в том числе для производства различных сплавов в авиастроении, управляемых снарядов, вакуумных ламп для инфракрасной сигнализации и контроля, лазерных видеоискателей, указателей цели и др. Превышение ПДК зафиксировано по хрому во всех отобранных пробах (в 1,2–2,8 раза).

Для оценки зависимости химического загрязнения почв от деградации рельефа на полигоне рассчитывали ранговый коэффициент корреляции Спирмена  $R_s$ , устанавливающий тесноту и направление связи между безразмерными коэффициентами  $K_x$  и  $K_d$  [Гмурман, 2004]:

$$R_s = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^m d_i^2}{m^3 - m}, \quad (2)$$

где  $m$  – число рангов (градаций), на которые разбиты коэффициенты опасности  $K_d$  и  $K_x$ ,  $d_i$  – разность математических ожиданий  $M_{ид}$  и  $M_{ix}$  коэффициентов опасности в соответствующих рангах, вычисляемых по формулам:

$$M_{ид} = P_{ид} \cdot \langle K_{ид} \rangle, \quad (3)$$

$$M_{ix} = P_{ix} \cdot \langle K_{ix} \rangle, \quad (4)$$

$$d_i = |M_{ид} - M_{ix}|, \quad (5)$$

где  $\langle K_{ix} \rangle$  и  $\langle K_{ид} \rangle$  – средние значения коэффициентов опасности химического загрязнения и деградации почв в каждой градации;  $P_i = n_i / N$  – повторяемость, равная отношению измерений  $n$ , попавших в каждую градацию, к общему числу измерений  $N$ .

Для репрезентативности коэффициента корреляции количество рангов  $m$  должно быть не менее пяти. Статическая значимость рассчитанного коэффициента  $R_s$  оценивается по  $t$ -критерию Стьюдента. При уровне значимости  $p = 0,01$  и количеству проведенных измерений  $n = 342$  критическое значение коэффициента составляет 0,39. Условно оценивали силу связи между признаками, считая значения  $R_s \leq 0,39$  показателями слабой тесноты связи;  $0,50 < R_s < 0,80$  – средней;  $R_s \geq 0,80$  – высокой.

Вычисленный по формуле (2) коэффициент корреляции  $R_s = 0,85$ , т. е. между деградацией рельефа полигона и химическим загрязнением почв существует высокая теснота связи. Результаты статистических исследований показателей деградации рельефа и химического загрязнения почв приведены в табл. 2.

Математические ожидания коэффициентов опасности  $M$  по деградации и химическому загрязнению почв полигона приведены в последнем столбце табл. 1. Фактически  $M_x$  и  $M_d$  – это экологические риски химического загрязнения и деградации почв полигона в целом, которые рассчитываются по формуле:

$$M_d = \sum_{i=1}^5 P_{ид} \langle K_{ид} \rangle; \quad M_x = \sum_{i=1}^5 P_{ix} \langle K_{ix} \rangle. \quad (6)$$



Таблица 2  
 Table 2

Статистические показатели деградации рельефа и химического загрязнения почв  
 в каждом ранге и на полигоне в целом  
 Statistical indicators of terrain degradation and chemical contamination of soils  
 in each rank and at the landfill as a whole

Вид деградации	Показатели деградации	1	2	3	4	5	<i>M</i>	
Химическое загрязнение почв полигона	$\langle K_{ix} \rangle$	1,43	2,33	4,75	6,1	8,49	19	
	$P_{ix}$	0,333	0,2	0,2	0,067	0,2		
	$M_{ix}$	0,478	0,466	0,992	0,409	1,698	4,02	
Деградация рельефа полигона	$\langle K_{ид} \rangle$	2,7	5,4	8,3	9,9	11,8		
	$P_{ид}$	0,36	0,13	0,24	0,17	0,1		
	$M_{ид}$	0,97	0,7	2,0	1,69	1,18	6,54	
	$M_{ид} - M_{ix}$		$d_i$	0,492	0,234	1,008	1,281	0,518

Вычисляли совместный статистический коэффициент опасности химического загрязнения эталонной воронки с учетом тесноты связи признаков деградации полигона по формуле:  $M_{xI} = M_x \cdot R_s = 4,02 \cdot 0,85 = 3,42$ , что соответствует допустимому уровню загрязнения почв.

Статистическую химическую опасность загрязнения каждого пикселя полигона рассчитывали по формуле:

$$M_i = M_{ix} \cdot N_i,$$

где  $N_i$  – число неоднородностей (воронки) в  $i$ -том пикселе полигона.

Как следует из расчетов, экологический риск деградации рельефа больше, чем геохимический за счет значительной площади поверхности воронок, т. к. загрязнение приповерхностной части литосферы не двумерное, а трехмерное. Максимальные повторяемости  $P_i$  наблюдаются в первой градации, но за счет низких значений коэффициентов опасности риски относительно невысокие.

Статистическая оценка опасности деградации рельефа  $M_{ид}$  больше, чем опасность химического загрязнения почв  $M_{ix}$  в 1,6 раза. Это свидетельствует о приоритете деградации рельефа при трехмерном разрушении почв. Если химическую опасность пересчитать по классической формуле (1), то  $Z_c = 19 - 14 = 5$ . Стандартный показатель химического загрязнения несколько выше, чем статистическая оценка химической деградации ( $M_{ix} = 4,02$ ).

Ранговый коэффициент корреляции между деградацией рельефа полигона и химическим загрязнением почв  $R_s = 0,85$ , что для пяти выбранных градаций является значимой величиной. Таким образом, между плотностью воронок в пикселе и загрязнением почвы существует тесная прямая связь, что подтверждает возможность статистической оценки химического загрязнения территории полигона по оценке опасности химического загрязнения «эталонной» воронки.

Данные по числу воронок и химическому загрязнению в каждом пикселе для построения цифровой карты участка полигона представлены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, уровень химического загрязнения одного пикселя находится в рамках допустимого при числе воронок в нем менее 5.

Для цветовой передачи уровня химического загрязнения почв на карте выделено пять нормированных уровней загрязнения полигона (табл. 4).

Таблица 3  
Table 3

Химическое загрязнение почв полигона в каждом пикселе  
Chemical contamination of landfill soils in each pixel

Номер пикселя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Количество воронок	1	5	4	19	36	10	3	7	6	2	14	8	4	10	2	4	5	3
$M_{xi}$	3,42	17,1	13,7	65	123	34,2	10,3	24	20,5	6,8	47,9	27,4	13,7	34,2	6,8	13,7	17,1	10,3
Номер пикселя	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Количество воронок	7	8	9	6	11	14	8	11	19	10	7	8	12	10	23	27	20	9
$M_{xi}$	24	27,4	30,8	20,5	37,6	47,9	27,4	37,6	65	34,2	24	27,4	41	34,2	78,7	92,3	68,4	30,8

Таблица 4  
Table 4

Зонирование авиационной части полигона по нормированным уровням опасности  
Zoning of the aviation part of the landfill according to normalized hazard levels

Уровни опасности по $Z_c$	0–16	16–32	32–64	64–128	>128
Цвет опасности	Синий	Зеленый	Оранжевый	Светло-красный	Красный
Уровень опасности по $M_x$	Допустимый	Умеренный	Опасный	Очень опасный	Чрезвычайно опасный
Повторяемость опасности $P_j$	0,22	0,36	0,25	0,17	–

По расчетным данным построена цифровая карта загрязнения почвы для каждого пикселя с учетом числа воронок в нем (рис. 1).

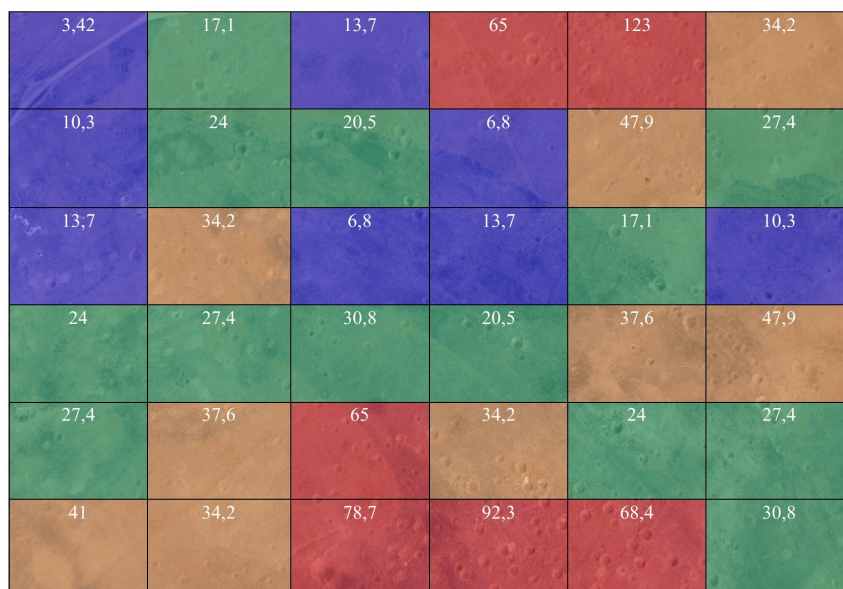


Рис. 1. Цифровая карта экологического загрязнения почвы авиационного полигона  
Fig. 1. Digital map of environmental pollution of the soil of the aviation landfill

Для оценки экологической ситуации на всем полигоне одним числом в соответствии с уровнем загрязнения почв  $Z_c$  в зонах I–V, строили гистограмму (рис. 2). По оси абсцисс указаны уровни загрязнения почв и зоны загрязнения; по оси ординат – их повторяемости на полигоне. Загрязнение почв в градации рассчитывали, как среднеарифметическое значение  $Z_j$  (I–V), попавших в градацию. Повторяемость градации  $P_j$  определяли как отношение числа воронок в одной градации к общему числу воронок.

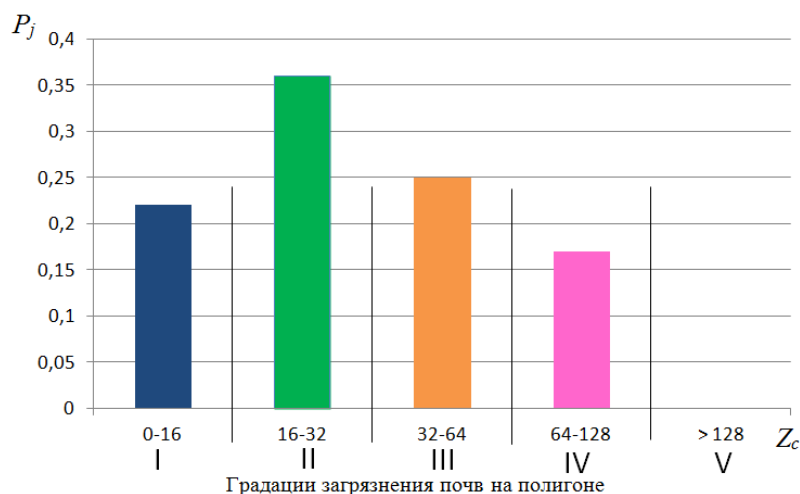


Рис. 2. Закон распределения загрязнения почвы полигона по выделенным градациям  
 Fig. 2. The law of distribution of landfill soil pollution by selected gradations

Средневзвешенный уровень химического загрязнения почв полигона – математическое ожидание – рассчитывали по формуле:

$$\langle M \rangle = \sum_{j=1}^5 (P_j \langle K_j \rangle) = 36,5. \quad (6)$$

Среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_{\langle M \rangle} = \sqrt{\sum_{j=1}^5 P_j (\langle M \rangle - \langle M_j \rangle)^2} = 22. \quad (7)$$

Вариабельность загрязнения почв на полигоне  $\varepsilon = 60,3 \%$ .

Интегральное загрязнение почв полигона соответствует уровню «опасное», что связано с трехмерностью загрязнения приповерхностной части литосферы. Значительная вариабельность загрязнения почв связана с неравным размещением целей на авиационном полигоне.

### Заключение

1. Осуществлен статистический анализ уровня деградации рельефа и химического загрязнения почв полигона. Показано, что статистическая оценка опасности деградации рельефа больше, чем опасность химического загрязнения почв в 1,6 раза. Это свидетельствует о приоритете деградации рельефа при трехмерном разрушении почв.

2. Загрязнение авиационной части полигона трехмерное за счет глубины воронок, что определяет очень высокий уровень его геохимического загрязнения  $\langle M \rangle = 36,5$ , при коэффициенте вариации  $\varepsilon = 60,3 \%$ .

3. Доказана высокая теснота связи между деградацией рельефа и химическим загрязнением полигона ( $R_s = 0,85$ ). Зная средний показатель загрязнения «эталонной воронки» и плотность воронок на единице площади, возможно построить цифровую карту



загрязнения почв полигона. На карте показаны загрязнение почвы в каждом пикселе, которые необходимо выводить из эксплуатации, и участки, которые еще возможно использовать в военных целях.

4. Дифференциальная карта загрязнения зон полигона и оценка загрязнения всей территории в целом позволяют разработать оптимальную стратегию его эксплуатации. Так для пикселей с  $\langle M \rangle \geq 64$  площадь заполнения территории воронками приближается к 50 %.

С учетом низкой устойчивости песчаных склонов воронок и расположения полигона на водоразделе рек Дон и Воронеж с уклонами порядка  $1^\circ$  за счет ветровой эрозии и осадков, высокой плотности воронок в некоторых пикселях вероятно начало образования овражно-балочной системы со значительным ее химическим загрязнением. При этом происходят необратимые изменения рельефа полигона, т. е. такие пиксели территории полигона необходимо выводить из эксплуатации и консервировать, проводить реабилитацию территории для дальнейшего использования.

#### Список источников

- Гмурман В.Е. 2004. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва, Высшая школа, 479 с.
- ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа (введен в действие Приказом Росстандарта от 17.04.2018 N 202-ст). Электронный ресурс. URL: [http://tunadzor.ru/upload/doc/departments/277/m\\_gost\\_17.4.4.02-2017.pdf](http://tunadzor.ru/upload/doc/departments/277/m_gost_17.4.4.02-2017.pdf) (дата обращения: 3 августа 2023).
- Валеев М.Н. 2012. Международное экологическое право. Международно-правовая охрана окружающей среды во время международных конфликтов. Институт экономики и права Ивана Кушнера. Электронный ресурс. URL: <https://be5.biz/pravo/m008/11.html> (дата обращения: 5 февраля 2023).
- Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Пантелеев Д.А. 2023. Экология почв военных полигонов. Воронеж, Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 184 с.
- Кочетова Ж.Ю., Маслова Н.В., Базарский О.В. 2022. Авиационно-ракетные кластеры и окружающая среда. Москва, ИНФРА-М, 266 с.
- ОСТ 41-08-212-04. 2004. Стандарт отрасли. Управление качеством аналитических работ. Нормы погрешности при определении химического состава минерального сырья и классификация методик лабораторного анализа по точности результатов. Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского», 23 с.
- СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий»: постановление главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 3. Электронный ресурс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_376166/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_376166/) (дата обращения: 10 апреля 2021).
- Трофимов В.Т., Хачинская Н.Д., Цуканова Л.А., Юров Н.Н., Королев В.А., Григорьева И.Ю., Харькина М.А. 2014. Геологическое пространство как экологический ресурс и его трансформация под влиянием техногенеза. Москва, Академическая наука–Геомаркетинг, 566 с.

#### Список литературы

- Адушкин В.В., Христофоров Б.Д. 2004. Воронки наземных крупномасштабных взрывов. Физика горения и взрыва, 40(6): 71–75.



- Андреев В.Г. 2016. Вторая индокитайская война как техногенная экологическая катастрофа. Вестник академии военных наук, 2(15): 53–60.
- Базарский О.В., Пантелеев Д.А., Кочетова Ж.Ю. 2022. Геоэкологическая модель для прогнозирования деградации и восстановления рельефа военных полигонов. Региональные геосистемы, 46(1):119–131. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-1-119-131>.
- Василюк А. 2022. Экологические последствия российско-украинской войны. Экология и право, 85: 4–15.
- Иванец М.О., Григорьева О.В., Саидов А.Г. 2019. Анализ экологической обстановки на объектах Минобороны России в Арктической зоне. Военная мысль, 4: 73–80.
- Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Маслова Н.В. 2017. Мониторинг содержания нефтепродуктов и азота в грунтах экологически опасного объекта и прилегающих к нему территорий. Успехи современного естествознания, 10: 83–89.
- Крюченко Н.О., Жовинский Э.Я., Панаит Э.В., Андриевская Е.А. 2015. Цинк и ртуть в почвах и растениях техногенно загрязненных территорий (на примере Яворовского военного полигона и территории завода «Радикал»). ScienceRise, 7(1(12)): 18–23. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.47226>.
- Кудельский А.В., Стародубова А.П., Феденя В.М., Бурак В.М. 1997. Экология территории бывших военных баз. ЛІТАСФЕРА, 7: 153–166.
- Манукян Д.А. 2009. Вопросы безопасности региона Персидского залива. Вестник Санкт-Петербургского университета. Политология. Международные отношения, 4: 160–168.
- Новиков С.С. 2011. Экологические и правовые аспекты бомбардировок Югославии в 1999 г. Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2: 136–139.
- Окимбеков У.В. 2015. Демографические и экологические проблемы современного Афганистана. Ислам на Ближнем и Среднем Востоке, 9: 75–82.
- Пантелеев Д.А., Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В. 2022. Оценка загрязнения почв металлами на военном полигоне «Погоново» (г. Воронеж). В кн.: Экологические проблемы продовольственной безопасности (EPFS 2022). Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 21–22 февраля 2022. Воронеж, Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I: 61–65.
- Пархитко Н.П. 2016. Хиросима и Нагасаки: преступление, которого можно было избежать. Вестник МГИМО-Университета, 4(49): 79–87.
- Аль Сабунчи А.М.А., Аль Сабунчи А. 2009. Эколого-гигиенические проблемы Ирака. Вестник Российского государственного медицинского университета, 1: 71–73.
- Смурыгин А.В., Бакин Э.Н., Асеев В.А. 2019. Особенности экологического обеспечения в Вооруженных Силах Российской Федерации. Пожарная безопасность: проблемы и перспективы, 1(10): 393–395.
- Трофимов В.Т., Харькина М.А., Жигалин А.Д., Барабошкина Т.А. 2019. Техногенная трансформация экологических функций абиотических сфер Земли под влиянием военной деятельности. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 1: 3–13.
- Хусаинова Р.З., Чуйков Ю.С. 2013. Проблемы экологической безопасности и безопасности персонала и населения при утилизации непригодных к использованию боеприпасов. Астраханский вестник экологического образования, 2(24): 156–169.
- Eriksson J., Frankki S., Shchukarev A., Skyllberg U. 2004. Binding of 2,4,6-Trinitrotoluene, Aniline, and Nitrobenzene to Dissolved and Particulate Soil Organic Matter. Environmental Science and Technology, 38(11): 3074–3080. <https://doi.org/10.1021/es035015m>.
- Kalderis D., Juhasz A.L., Woopathy R., Comfort S. 2011. Soils Contaminated with Explosives: Environmental Fate and Evaluation of State-of-the-Art Remediation Processes (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry, 83(7): 1407–1484. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-01-05>.
- Kelley C.P., Mohtadi Sh., Cane M.A., Seager R., Kushnir Y. 2015. Climate Change in the Fertile Crescent and Implications of the Recent Syrian Drought. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(11): 3241–3246. <https://doi.org/10.1073/pnas.1421533112>.

- Kochetova Zh.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): 2990–2996. <https://doi.org/10.1134/S1070363218130261>
- Martel R., Mailloux M., Gabriel U., Lefebvre R., Thiboutot S., Ampleman G. 2009. Behavior of Energetic Materials in Ground Water at an Anti-Tank Range. *Journal of Environmental Quality*, 38: 75–92. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0606>

## References

- Adushkin V.V., Khristoforov B.D. 2004. Voronki nazemnykh krupnomasshtabnykh vzryvov [Large-Scale Ground Explosion Craters]. *Fizika gorennya i vzryva*, 40(6): 71–75.
- Andreev V.G. 2016. Vtoraya indokitayskaya vojna kak tekhnogennaya ekologicheskaya katastrofa [The Second Indochina War as a Man-Made Environmental Disaster]. *Vestnik akademii voyennykh nauk*, 2(15): 53–60.
- Bazarsky O.V., Panteleev D.A., Kochetova Zh.Yu. 2022. Geoecological Model for Predicting Degradation and Restoration of the Relief of Military Landfills. *Regional Geosystems*, 46(1): 119–131 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-1-119-131>.
- Vasilyuk A. 2022. Ekologicheskiye posledstviya rossiysko-ukrainskoy voyny [Environmental Consequences of the Russian-Ukrainian War]. *Ekologiya i pravo*, 85: 4–15.
- Ivanets M., Grigoryeva O., Saidov A. 2019. Analysis of the Environmental Situation at Mod Facilities in the Arctic. *Military Thought*, 4: 73–80 (in Russian).
- Kochetova Zh.Yu., Bazarskiy O.V., Maslova N.V. 2017. Content Monitoring of Oil And Nitrogen in the Soil of Ecologically Dangerous Object and the Surrounding Regions. *Advances in current natural sciences*, 10: 83–89 (in Russian).
- Kryuchenko N.O., Zhovinsky E.Ya., Panait E.V., Andrievskaya E.A. 2015. Tsink i rtut v pochvakh i rasteniyakh tekhnogenno zagryaznennykh territoriy (na primere Yavorovskogo voyennogo poligona i territorii zavoda «Radikal») [Zinc and Mercury in Soils and Plants of Technogenically Contaminated Areas (Using the Example of the Yavorovsky Military Training Ground and the Territory of the Radikal Plant)]. *ScienceRise*, 7(1(12)): 18–23. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.47226>.
- Kudelsky A.V., Starodubova A.P., Fedenya V., Burak V.M. 1997. Ecology of Territories of Former Military Bases. *LITASFERA*, 7: 153–166 (in Russian).
- Manukyan D.A. 2009. Security Challenges of the Persian Gulf Region. *Vestnik of Saint Petersburg University. Political Science. International Relations*, 4: 160–168 (in Russian).
- Novikov S.S. 2011. Ekologicheskiye i pravovyye aspekty bombardirovok Yugoslavii v 1999 g. [Environmental and Legal Aspects of the Bombing of Yugoslavia in 1999]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2: 136–139.
- Okimbekov U.V. 2015. Demographic and Ecological Problems of the Contemporary Afghanistan. *Islam na Blizhnem i Srednem Vostoke*, 9: 75–82 (in Russian).
- Panteleev D.A., Kochetova Zh.Yu., Bazarsky O.V. 2022. Assessment of Soil Contamination with Metals at the Military Training Ground «Pogonovo» (Voronezh). In: *Environmental Issues in Food Security (EPFS 2022)*. Proceedings of the international scientific and practical conference, Voronezh, 21–22 February 2022. Voronezh, Publ. Voronezhskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. Imperatora Petra I: 61–65 (in Russian).
- Parkhitko N.P. 2016. Nuclear Strike Against Hiroshima and Nagasaki. War Crime, that Could be Avoided. *MGIMO Review of International Relations*, 4(49): 79–87 (in Russian).
- Al Sabounchi A.M.A., Al Sabounchi A. 2009. Environmental Pollution in Iraq. *Bulletin of RSMU*, 1: 71–73 (in Russian).
- Smurygin A.V., Bakin E.N., Aseev V.A. 2019. Osobennosti ekologicheskogo obespecheniya v Vooruzhennykh Silakh Rossiyskoy Federatsii [Features of Environmental Support in the Armed Forces of the Russian Federation]. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy*, 1(10): 393–395.
- Trofimov V.T., Kharkina M.A., Zhigalin A.D., Baraboshkina T.A. 2019. Technogenic Transformation of the Ecological Functions of Abiotic Spheres of the Earth Under the Influence of Military Activities. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 1: 3–13 (in Russian).



- Husainova R., Chuikov Yu.S. 2013. The Problems of Environmental Safety and Security of Personnel and the Public when Disposing of an Unserviceable Ammunition. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, 2(24): 156–169 (in Russian).
- Eriksson J., Frankki S., Shchukarev A., Skyllberg U. 2004. Binding of 2,4,6-Trinitrotoluene, Aniline, and Nitrobenzene to Dissolved and Particulate Soil Organic Matter. *Environmental Science and Technology*, 38(11): 3074–3080. <https://doi.org/10.1021/es035015m>.
- Kalderis D., Juhasz A.L., Boopathy R., Comfort S. 2011. Soils Contaminated with Explosives: Environmental Fate and Evaluation of State-of-the-Art Remediation Processes (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 83(7): 1407–1484. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-01-05>.
- Kelley C.P., Mohtadi Sh., Cane M.A., Seager R., Kushnir Y. 2015. Climate Change in the Fertile Crescent and Implications of the Recent Syrian Drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(11): 3241–3246. <https://doi.org/10.1073/pnas.1421533112>.
- Kochetova Zh.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): 2990–2996. <https://doi.org/10.1134/S1070363218130261>
- Martel R., Mailloux M., Gabriel U., Lefebvre R., Thiboutot S., Ampleman G. 2009. Behavior of Energetic Materials in Ground Water at an Anti-Tank Range. *Journal of Environmental Quality*, 38: 75–92. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0606>

*Поступила в редакцию 29.10.2023;  
поступила после рецензирования 22.11.2023;  
принята к публикации 05.12.2023*

*Received October 29, 2023;  
Revised November 22, 2023;  
Accepted December 05, 2023*

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.  
**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пантелеев Дмитрий Александрович**, старший помощник начальника отдела Центра организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

**Базарский Олег Владимирович**, профессор кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

**Кочетова Жанна Юрьевна**, доцент кафедры эксплуатации и ремонта САТОП, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dmitry A. Panteleev**, Senior Assistant to the Head of the Department of the Center for the Organization of Scientific Work and Training of Scientific and Pedagogical Personnel of the Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia

**Oleg V. Bazarskij**, Professor of the Department of Physics and Chemistry of the Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia

**Zhanna Yu. Kochetova**, Associate Professor of the Department of Operation and Repair of SATOP of the Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia