

УДК 543.31:542.08
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-1-119-131

Геоэкологическая модель для прогнозирования деградации и восстановления рельефа военных полигонов

Базарский О.В., Пантелейев Д.А., Кочетова Ж.Ю.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Россия, 394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А
E-mail: arhangelskaya49@mail.ru, zk_vva@mail.ru

Аннотация. Военная деятельность наносит колоссальный ущерб окружающей среде и в мирное, и в военное время. В отличие от химического и физического загрязнения объектов окружающей среды в результате проведения учений, боевых действий, испытаний нового вооружения, не достаточно исследовано влияние военной деятельности на изменение ландшафтов обширных и разнообразных территорий. Целью этой работы является построение геоэкологической энтропийной модели для оценки и прогнозирования уровня экологической деградации рельефа территорий авиационных полигонов (на примере полигона «Погоново», г. Воронеж). В работе показано, что законы распределения экологических величин не случайные, а квазидетерминированные, поэтому аддитивное сложение энтропий различных подсистем возможно лишь в случае идентичных законов их распределения. С помощью построенной модели проведена оценка развития экологической ситуации на полигоне «Погоново». Показано, что экологическая система, находящаяся на границе рангов норма – риск, восстанавливается до абсолютно устойчивого уровня 0,995 за 30 лет после прекращении антропогенного воздействия. Верхняя граница устойчивости геоэкологической системы наблюдается, когда площадь воронок равна половине площади полигона; это состояние является равновесным при прекращении антропогенного воздействия. Если система находится в области компенсируемого кризиса, то при прекращении деятельности полигона в ранг экологического риска система самопроизвольно возвратится через 100 лет, далее останется в равновесном состоянии. При возникновении хаотического состояния системы (бифуркации) происходит образование овражно-балочного рельефа, тогда прогноз развития и самовосстановление системы невозможны.

Ключевые слова: деградация рельефа, военные полигоны, авиационные полигоны, устойчивость экологических систем, энтропийный подход, модель Ферхольста

Для цитирования: Базарский О.В., Пантелейев Д.А., Кочетова Ж.Ю. 2022. Геоэкологическая модель для прогнозирования деградации и восстановления рельефа военных полигонов. Региональные геосистемы, 46(1): 119–131. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-1-119-131

Geoecological model for predicting degradation and restoration of the relief of military landfills

Oleg V. Bazarskij, Dmitry A. Panteleev, Zhanna Yu. Kochetova

Military Educational and Scientific Center Air Force "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy", 54A Starykh Bol'shevиков St, Voronezh 494064, Russia
E-mail: zk_vva@mail.ru

Abstract. Military activity causes enormous damage to the environment both in peacetime and in wartime. Unlike chemical and physical pollution of environmental objects as a result of exercises, combat operations, and testing of new weapons, the impact of military activity on changing the landscapes of quite

extensive and diverse territories has not been sufficiently investigated. The purpose of this work is to build a geoecological entropy model for assessing and predicting the level of environmental degradation of the relief of the territories of aviation polygons (using the example of the «Pogonovo» landfill, Voronezh). On the basis of the universal entropy model, a methodology for assessing and predicting the degradation and restoration of the relief of military ranges has been developed. The paper shows that the laws of distribution of ecological quantities are not purely random, but quasi-deterministic, therefore, additive addition of entropies of various subsystems is possible only in the case of identical laws of their distribution. With the help of the developed methodology, an assessment of the development of the ecological situation at the «Pogonovo» landfill was carried out. It is established that the ecological system located on the border of the norm-risk ranks is restored to an absolutely stable level of 0.995 for 30 years after the cessation of anthropogenic impact. With the intensification of the landfill activity to the level of average risk, the level of stability will decrease to 0,62 in 10 years. The upper limit of the stability of the geoecological system is observed when the area of the funnels is equal to half the area of the landfill; this state is equilibrium when anthropogenic impact ceases. If the system is in the area of a compensable crisis, then when the landfill activity ceases, the system spontaneously returns to the rank of environmental risk after 100 years, then remains in an equilibrium state. When a chaotic state of the system (bifurcation) occurs, the formation of a gully-beam relief occurs, then the forecast of development and self-healing of the system is impossible.

Keywords: terrain degradation, military ranges, aviation ranges, sustainability of ecological systems, entropy approach, Ferhulst model

For citation: 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). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-1-119-131

Введение

Площадь принадлежащих военным ведомствам территорий по разным оценкам составляет 750 тыс.–1,5 млн км². Военные базы и формирования могут занимать до 17 % от общей площади страны [Кудельский и др., 1997]. Во многих случаях это крупные лесные массивы, плодородные земли и пастбища, изъятие которых из сферы промышленного и сельскохозяйственного производства отрицательно оказывается на общем экономическом потенциале государства и жизненном уровне населения. Площади территорий, периодически подверженных влиянию военной деятельности, еще обширнее. К ним относятся территории для маневров, учебных выходов на местность, районы падения отработавших ступеней ракет, а также территории, загрязненные в результате деятельности военных объектов [Геологическое..., 2014; Кочетова и др., 2022].

Испытание оружия, ракетной и космической техники, ведение войн становятся серьезными факторами дестабилизации взаимодействия живой и неживой природы. В связи с разработкой новых видов вооружения, непрекращающимися военными локальными конфликтами, освоением военными новых территорий для размещения баз по всему миру, воздействие на окружающую среду приобрело глобальный характер. Военная деятельность наносит колоссальный экологический ущерб различным объектам окружающей среды, при этом наиболее масштабной трансформации и загрязнению подвержены почвы и грунты [Зонн, Зонн, 2002; Харькина, 2004; Забураева, 2012]. В.Т. Трофимов с соавторами [2019] выделяет ресурсную, геодинамическую, геофизическую, геохимическую функции трансформации литосферы в результате военной деятельности, которые для объективной оценки состояния окружающей среды необходимо рассматривать в комплексе. В открытой литературе приводятся некоторые разрозненные исследования о последствиях химического и физического загрязнения литосферы военными объектами [Pennington, Brannon, 2002; Jenkins et al., 2006; Douglas et. al., 2010; Сафонич, Колесникова, 2011; Хусаинова, Чуйков, 2013; Крюченко и др., 2015; Смурыгин и др., 2019; Кочетова и др., 2020], однако об оценке и про-

гнозировании преобразования рельефа почв в результате ведения боевых действий или учений данные практически отсутствуют.

В геоэкологии под рельефом понимают совокупность неровностей земной поверхности, разных по форме, размерам, происхождению, возрасту и истории развития¹. Неровности от 2 до 50 м в диаметре классифицируют как мелкомасштабные, к ним относятся карстовые и супффузионные воронки, кратеры от ударов метеоритов, а также воронки антропогенного происхождения. Мелкомасштабные изменения рельефа, присущие всем военным полигонам, практически не изучены. Особенностью рельефов полигонов является то, что размеры неровностей существенно меньше природных, но их количество на единицу площади значительно больше, что приводит к экологической опасности деградации территорий военных полигонов, особенно авиационных. На сегодняшний день методика экологической опасности мелкомасштабной деградации рельефа военных полигонов не развита, и не ясны возможности экономического использования таких территорий при прекращении деятельности полигонов.

Цель исследований – построение циклической нелинейной модели развития геоэкологической системы для оценки и прогнозирования деградации и восстановления ее рельефа при различных уровнях антропогенного воздействия.

Объекты и методы исследования

Деградация рельефа авиационных полигонов исследована на примере участка полигона «Погоново», используемого аэродромом государственной авиации «Балтимор» для применения неуправляемых авиационных средств поражения калибром до 500 кг. Полигон создан в послевоенные годы, он расположен в заповедном лесу между миллионным городом Воронеж и озером Погоново, в 18 км от запретной зоны Нововоронежской АЭС.

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 [Глушков, 2011]. Грязь простирается с севера на 180 км от с. Хлевное Липецкой обл. до устья р. Икорец, проходит по водоразделу р. Дон и р. Воронеж. По левобережью р. Дон и к югу от устья р. Икорец грязь сохранилась в виде останца на междуречье р. Дон и р. Битюг. В рельефе представляет собой вал с увалистой поверхностью на абсолютных высотах до 170 м, который возвышается над аллювиальной равниной на 25–30 м. Западный склон сложен песками мощностью до 80 м, к востоку они сменяются суглинками. Подошва тела грязи слабо вогнутая и изменяется от +100 до +70–80 м. Севернее с. Хлевное грязь переходит в моренные образования, а южнее Павловска – в долинный зандр. Образование вала происходило в глубоком каньоне с ледовыми бортами, проложенном талыми водами по направлению стока, близкому к доледниковой долине. После таяния льда флювиогляциальное тело стало иметь вид возвышенной грязи. Абсолютные отметки его поверхности 165–172 м, ширина вала до 8 км. Характерной особенностью возвышенной части вала является чрезвычайно слабая расчлененность рельефа и почти полное отсутствие покровных суглинков. Грунт полигона по максимальной глубине воронок – мелкозернистый песок, обладающий низкой устойчивостью по склонам.

Негативная сторона функционирования полигона связана с техногенным инициированием эрозионных процессов на участках, где плотно сгруппированные воронки группируются в узкие зоны, вытянутые по склону. В весенне-половодье, когда воронки переполняются вешними водами, могут быть прорывы стенок воронок с формированием ложбин стока, что более вероятно именно на восточном склоне, где развиты легко размываемые лессовидные суглинки. Профиль, вдоль которого возможно образование овражно-

¹ Рычагов Г.И. 2018. Геоморфология: учебник для академического бакалавриата. М., Издательство Юрайт, 396 с.

балочной системы, показан на рис. 1. Средний уклон к рекам Воронеж и Дон равен 1° . Площадь прямоугольника авиационной части составляет $1500 \times 400 = 0,6 \text{ км}^2$, главная ось бомбометания при этом расположена практически перпендикулярно водоразделу и совпадает с глиссадой взлета самолетов с аэродрома «Балтимор».



Рис. 1. Космический снимок и профиль территории, вдоль которой наиболее вероятно образование овражно-балочной системы (полигон «Погоново»)

Fig. 1. Satellite image and profile of the territory along which the formation of a gully-beam system is most likely (polygon "Pogonovo")

Фактическая база данных неровностей рельефа на авиационной части полигона сформирована путем фотографирования территории с беспилотного летательного аппарата. Разрешенная способность аппаратуры составляла 0,25 м при высоте полета 1710 м. Изучались три снимка с одинаковыми площадями 500×400 м, но с различным числом и диаметром воронок. Диаметры воронок на снимке измерялись с применением программного обеспечения *Agisoft Metashape Professional*.

Для оценки неоднородности рельефа некоторой области часто используют отношение числа локальных максимумов (минимумов) рельефа в исследуемой области к общему числу неровностей [Иоффе, 2013]. Широко применяемый показатель оценки неоднородности рельефа не может характеризовать уровень деградации рельефа военных полигонов вследствие геоэкологического разнообразия их территорий и пространственно-неравномерной деградации их рельефа. Для изученных сцен отношение суммарной площади воронок к площади авиационной части полигона изменялась от 1,7 до 2,2 %.

Поскольку диаметр воронок – случайная величина, то целесообразно для оценки уровня деградации рельефа сцены использовать статистический подход, для которого создана достаточно объемная база исходных данных.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе строили дискретные законы распределения случайной величины. Данные статистической обработки для изученных участков и всего авиационного полигона представлены в табл. 1–4. Средний диаметр каждой градации D_{icp} определяли, как среднее диаметров воронок, попавших в соответствующую градацию. Повторяемости градаций P_i рассчитывали как отношение числа воронок, попавших в i -ту градацию, к общему числу воронок на сцене. K_i – число состояний каждой градации, определяемое как отношение D_{icp} / D_ϕ , где D_ϕ – фоновое значение микромасштабных природных неоднородностей рельефа, принятых равными 2 м.

Таблица 1
 Table 1

Статистические данные первого участка полигона
 Statistical data of the first section of the polygon

Параметр	Градация							
	1	2	3	4	5	6	7	8
D , м	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18
D_{icp} , м	3,10	4,90	6,70	8,80	11,30	12,90	15,20	17,10
P_i	0,32	0,37	0,14	0,02	0,02	0,03	0,07	0,03
K_i	1,55	2,45	3,35	4,40	5,65	6,45	7,60	8,55
$\ln K_i$	0,44	0,90	1,21	1,48	1,73	1,86	2,03	2,15
S_i	0,14	0,33	0,17	0,03	0,03	0,06	0,14	0,06

Таблица 2
 Table 2

Статистические данные второго участка полигона
 Statistical data of the second section of the polygon

Параметр	Градация											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D , м	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	20–22	22–24	24–26
D_{icp} , м	3,20	5,10	6,90	8,60	10,80	12,80	15,20	17,10	19,40	21,40	23,80	25,00
P_i	0,22	0,30	0,06	0,04	0,04	0,04	0,12	0,09	0,02	0,03	0,01	0,02
K_i	1,60	2,55	3,45	4,30	5,40	6,40	7,60	8,55	9,70	10,70	11,90	12,50
$\ln K_i$	0,47	0,94	1,24	1,46	1,69	1,86	2,03	2,15	2,27	2,37	2,48	2,53
S_i	0,10	0,28	0,08	0,06	0,07	0,08	0,25	0,19	0,05	0,07	0,03	0,05

Таблица 3
 Table 3

Статистические данные третьего участка полигона
 Statistical data of the third section of the polygon

Параметр	Градация										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D , м	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	20–22	22–24
D_{icp} , м	3,20	5,50	7,50	9,10	10,50	12,70	15,20	17,00	18,00	20,40	22,70
P_i	0,22	0,07	0,07	0,02	0,07	0,02	0,05	0,15	0,04	0,17	0,10
K_i	1,60	2,75	3,75	4,55	5,25	6,35	7,60	8,50	9,00	10,2	11,4
$\ln K_i$	0,47	1,01	1,32	1,52	1,66	1,85	2,03	2,14	2,20	2,32	2,43
S_i	0,10	0,07	0,10	0,04	0,12	0,05	0,10	0,31	0,09	0,40	0,24

Таблица 4
 Table 4

Статистические данные всего авиационного полигона
 Statistical data of the entire aviation range

Параметр	Градация											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D , м	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	20–22	22–24	24–26
D_{icp} , м	3,10	5,00	6,80	8,80	11,00	12,80	15,20	17,10	18,90	20,70	22,90	25,50
P_i	0,28	0,31	0,13	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	0,01	0,03	0,02	0,01
K_i	1,55	2,50	3,40	4,40	5,50	6,40	7,60	8,55	9,45	10,40	11,40	12,80
$\ln K_i$	0,44	0,92	1,22	1,48	1,70	1,86	2,03	2,15	2,25	2,34	2,44	2,55
S_i	0,12	0,28	0,16	0,04	0,07	0,07	0,12	0,09	0,02	0,07	0,05	0,03

По статистическим распределениям вычислены математические ожидания случайной величины по формуле

$$M = \sum_{i=1}^N P_i K_i. \quad (1)$$

С учетом того, что K_i – это ущерб, вносимый каждой градацией в геоэкологическое состояние территории, а P_i – опасность этой градации, то средневзвешенное значение M является экологическим риском территории. Однако этот показатель можно применить только для сравнительного анализа деградации рельефа отдельных территорий, так как он не является аддитивным, а область его определения не ясна.

Модель оценки и прогнозирования уровня экологической деградации почв антропогенно-нагруженных территорий военного полигона. В работе Базарского О.В. и Кочетовой Ж.Ю. [2021] развита энтропийная модель оценки геоэкологической ситуации при антропогенном воздействии на окружающую среду. Она основана на нелинейном рекуррентном соотношении Ферхюльста, описывающем процесс нарастания динамического хаоса в статистической системе [Компьютеры ..., 1988].

Модифицированное для описания состояний геоэкологической системы соотношение Ферхюльста принимает следующий вид:

$$P_{n+1} = S \times P_0 \times (1 - P_n); \quad 0 \leq n \leq \gamma, \quad (2)$$

где P_0 и P_{n+1} – устойчивость экологической системы при начальных условиях ее существования и после n итераций. Выходные параметры системы после очередной итерации являются входными для следующей, то есть γ – число итераций; S – управляющий параметр, определяющий уровень беспорядка геоэкологической системы за счет антропогенного воздействия.

Таким образом, S – это энтропия геоэкологической системы. Значения S принадлежат интервалу $(0, 4)$, а P – интервалу $(0, 1)$. При $P = 0$ система абсолютно устойчива, что соответствует фоновому состоянию экологической системы. При $P = 1$ состояние системы соответствует абсолютно неустойчивому, хаотическому, при этом энтропия $S \rightarrow 4$. Одна итерация $n = 1$ соответствует одному году наблюдений. Увеличение энтропии системы приводит к увеличению ее неустойчивости, зависящей от числа итераций n , то есть времени развития геоэкологической ситуации. На рис. 2 приведена бифуркационная диаграмма модели для $n = 50$, что достаточно для оценки реального «горизонта прогноза».

Первая точка перегиба на диаграмме возникает при $S = 0,88$, когда наблюдается переход от фонового состояния системы при $P = 0$ к квазиустойчивому динамическому состоянию до уровней $P = 0,1$ и $S = 1,1$. Это область экологической нормы, когда система может самовосстанавливаться.

Область $1,1 < S \leq 2,0$ при $0,1 < P \leq 0,5$ является областью экологического риска, когда можно установить надежные статистические связи между уровнем энтропии системы и степенью ее экологической устойчивости. $S = 2$ – вторая устойчивая точка, где наблюдается второй перегиб кривой, при этом нарастание неустойчивости системы замедляется, но система продолжает движение в сторону увеличения антропогенного беспорядка с общим снижением устойчивости.

Следующая область диаграммы – переходная область компенсируемого кризиса перед наступлением первой бифуркации и переходу к хаотическому состоянию системы при условиях $2 < S \leq 2,9$ и $0,5 < P \leq 0,65$. В этом случае еще возможен возврат системы в область экологического риска.

При $2,9 < S \leq 3,5$ возникает первая бифуркация, когда система самопроизвольно выбирает одно из двух направлений развития с увеличением или уменьшением ее устойчивости, при этом $0,5 \leq P \leq 0,9$. Это состояние динамического хаоса, когда наблюдается

необратимый процесс возрастания и потери устойчивости системы – область некомпенсируемого экологического кризиса с резким сужением «горизонта прогноза» развития геоэкологической ситуации.

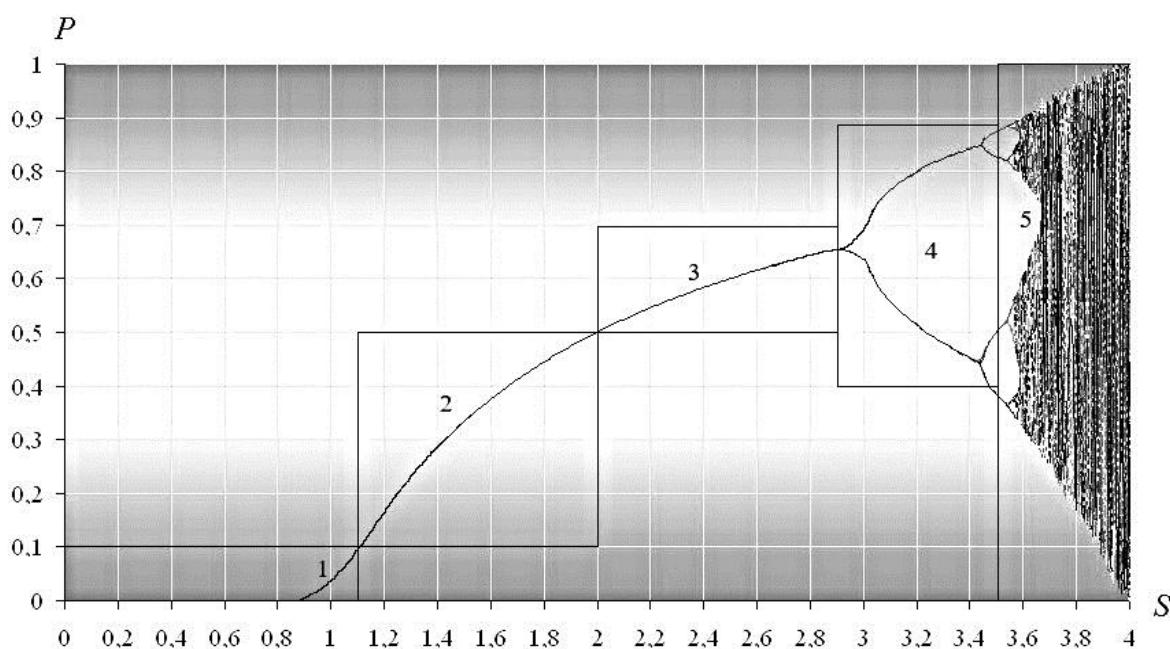


Рис. 2. Диаграмма неустойчивых состояний экологической системы P в зависимости от текущей энтропии S и времени наблюдений гамма [Составлено по Mathematics..., 1994]:
1 – фон (экологическая норма), 2 – экологический риск, 3 – компенсируемый кризис,
4 – некомпенсируемый кризис, 5 – бедствие

Fig. 2. Diagram of unstable states of the ecological system P depending on the current entropy S and the observation time gamma [Compiled by Mathematics..., 1994]: 1 – background (environmental norm), 2 – environmental risk, 3 – compensated crisis, 4 – uncompensated crisis, 5 – disaster

При $3,5 < S \leq 4$ возникает хаотическое состояние системы, когда прогноз ее развития невозможен из-за возникновения множества бифуркаций. Эта область называется областью абсолютного хаоса или экологического бедствия.

Представленная модель оценки неустойчивости геоэкологической системы не является аддитивной, в ней строго определены области возможного изменения энтропии и уровни устойчивости геоэкологической системы.

Чтобы энтропия была аддитивной величиной, необходимо перейти от числа состояний каждой градации K_i статистического распределения к логарифму их числа $\ln K_i$. Повторяемости состояний каждой градации определены в табл. 1–4. Тогда текущая энтропия каждого участка S_j рассчитывается по формуле

$$S_j = \sum_{i=1}^{N_j} P_i \cdot \ln K_i; \quad j = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Текущие уровни неустойчивости системы для каждого участка P_{0j} определялись путем подстановки текущей энтропии S_j в соотношение Ферхюльста или бифуркационную диаграмму. Результаты вычислений приведены в табл. 5.

Средняя энтропия первого и второго участков $S_{1,2} = (0,91 + 1,31) / 2 = 1,11$, что близко к энтропии полигона в целом ($S = 1,13$). Близки также величины экологической неустойчивости полигона $P = 0,12$ и этих участков $P_{1,2} = (0,02 + 0,24) / 2 = 0,13$.



Средняя энтропия полигона с учетом третьего участка $S_{1,2,3} = (0,91 + 1,31 + 1,62) / 3 = 1,2$ при неустойчивости $P_{1,2,3} = 0,21$ существенно отличается от соответствующих значений для полигона в целом. Этот результат вполне понятен, так как в физике, где энтропия – аддитивная величина, для различных макросистем справедливы распределения Максвелла и Больцмана, которые описывают чисто случайные процессы² [Иродов, 2015]. В геоэкологии законы распределения описывают квазидетерминированные процессы, когда в различных сочетаниях взаимодействуют случайные и детерминированные факторы. Поэтому аддитивность модели сохраняется, когда статистические законы для различных территорий идентичны.

Таблица 5
 Table 5

Уровни неустойчивости экологического состояния полигона
 Levels of instability of the ecological condition of the landfill

Параметр	Номер участка			Полигон
	1	2	3	
Текущая энтропия, S	0,91	1,31	1,62	1,13
Текущая неустойчивость системы, P	0,02	0,24	0,38	0,12
Экологический ранг системы	Норма	Риск	Риск	Риск

Прогноз развития геоэкологической ситуации на полигоне «Погоново». Текущая неустойчивость исследованных участков полигона бралась из табл. 5. Далее, по соотношению (2) рассчитывалась будущая неустойчивость каждого участка при различных уровнях энтропии. Результаты расчетов отображены на рис. 3.

Кривая 1 прогнозирует самовосстановление участка при прекращении деятельности полигона, когда текущая энтропия остается в ранге нормы, то есть $S_1 = 0,91$ при фоновом уровне неустойчивости, равном 0,02. За 30 лет экологическая неустойчивость участка снижается до уровня 0,005 и медленно стремится к нулю. Кривая 2 показывает, что при повышении интенсивности использования первого участка до уровня $S_2 = 1,31$ та же неустойчивость $P = 0,24$ будет достигнута за 35 лет. Соответственно, если интенсивность использования участка повысится до $S_3 = 1,61$, то уровень деградации, соответствующий третьему участку, будет достигнут через 15 лет (кривая 3).

Рис. 4 иллюстрирует прогнозируемое развитие экологической ситуации на втором и третьем участках полигона «Погоново».

Кривая 1 и 3 показывают, что если энтропию снизить до уровня нормы $S_1 = 0,91$, то устойчивость достигает фонового уровня $P_0 = 0,02$ за 23 года, и затем медленно снижается. Именно через столько лет этот участок будет готов к экономическому использованию.

До уровня деградации второго участка третий, при прекращении его использования, достигнет за 8 лет (кривая 4). Кривая 2 показывает, что увеличение неустойчивости второго участка до уровня третьего может произойти за 7 лет. Третий участок при той же интенсивности использования за 4 года приблизится к критическому уровню неустойчивости равному 0,48 (кривая 5).

Рисунок 5 иллюстрирует прогноз развития экологической ситуации для исследуемой части полигона в целом ($P_0 = 0,12$). При прекращении деятельности всего полигона снижение неустойчивости до приемлемого уровня 0,02 произойдет за 20 лет (кривая 1). Кривые 2 и 3 соответствуют возрастанию неустойчивости до уровня 0,24 при $S_2 = 1,31$ за 15 лет, а до 0,38 при $S_3 = 1,61$ за 9 лет. Закон распределения для полигона в целом показан на рис. 5. Он близок к законам распределения первого и второго исследуемых участков.

² Иродов И.Е. 2015. Физика макросистем. Основные законы. М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 210 с.

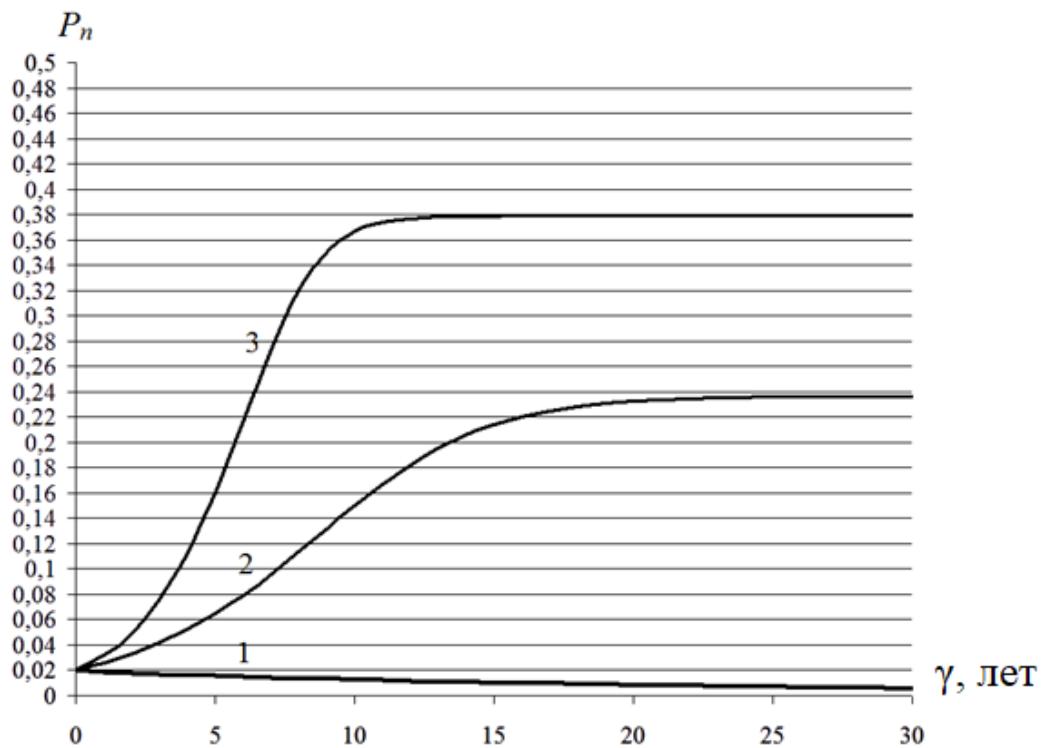


Рис. 3. Возможные пути развития 1–3 экологической ситуации на первом участке полигона «Погоново»

Fig. 3. Possible ways of development 1–3 of the ecological situation on the first site of the polygon «Pogonovo»

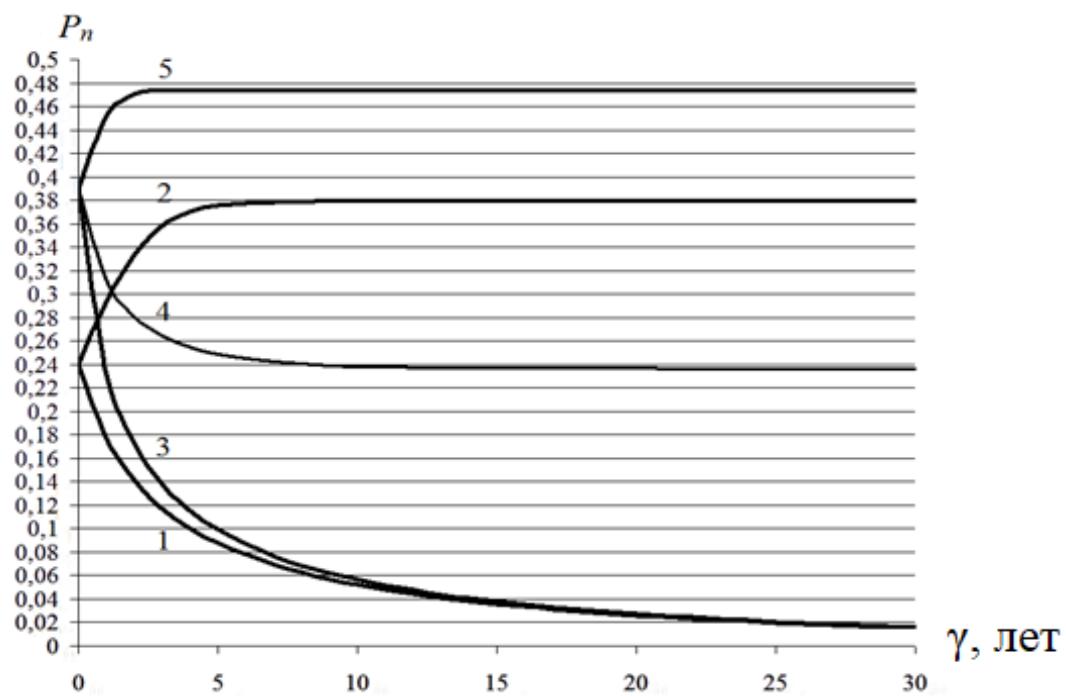


Рис. 4. Возможные пути развития 1–5 экологической ситуации на втором и третьем участках полигона «Погоново»

Fig. 4. Possible ways of development 1–5 of the ecological situation in the second and third sections of the «Pogonovo» landfill

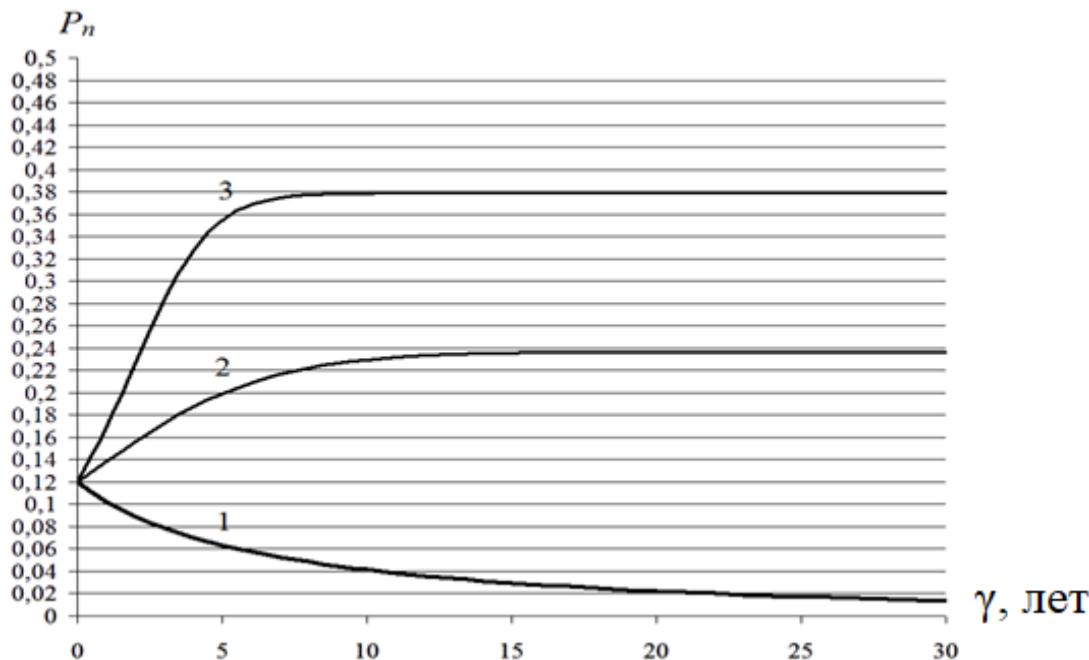


Рис. 5. Возможные пути развития экологической ситуации на всей исследуемой части полигона «Погоново»
 Fig. 5. Possible ways of the development of the ecological situation in the entire studied part of the polygon "Pogonovo"

Заключение

Построена геоэкологическая энтропийная модель оценки уровня экологической деградации территорий, подверженных антропогенному воздействию, протестированная на полигоне «Погоново». На базе построенной модели разработана методика оценки и прогнозирования деградации рельефа военных полигонов.

Поскольку законы распределения экологических величин не чисто случайные, а квазидетерминированные, когда в различных сочетаниях взаимодействуют случайные и детерминированные факторы, связанные с целенаправленной деятельностью человека, то аддитивное сложение энтропий различных подсистем возможно лишь в случае идентичных законов их распределения.

Методика прогнозирования развития экологической ситуации на полигоне «Погоново» показывает:

- экологическая ситуация находится в ранге «малый экологический риск», незначительно превышая верхнюю границу нормы;

- если прекратить использование полигона, то за 30 лет система восстанавливается до абсолютно устойчивого уровня 0,995, и тогда полигон будет готов к экономическому использованию. При интенсификации деятельности полигона до уровня среднего риска $S = 1,62$ уровень устойчивости снизится до 0,62 за 10 лет. Тогда без восстановительных мероприятий полигон не сможет экономически использоваться;

- верхняя граница устойчивости геоэкологической системы $P_0 = 0,5$ при $S = 2$, когда площадь воронок равна половине площади полигона; это состояние равновесия при прекращении антропогенного воздействия;

- если система находится в переходной области компенсируемого кризиса, то при прекращении деятельности полигона в ранг экологического риска с 50 % устойчивостью система самопроизвольно возвратится через 100 лет, а далее останется в равновесном состоянии;

– при возникновении хаотического состояния системы (бифуркации) происходит образование овражно-балочного рельефа, когда прогноз развития и самовосстановление системы невозможны.

Список литературы

- Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю. 2021. Энтропия абиотических геосфер и модель для оценки и прогноза их состояния. *Биосфера*, 13 (1–2): 9–14. DOI: 10.24855/biosfera.v13i1.572.
- Геологическое пространство как экологический ресурс и его трансформация под влиянием техногенеза. 2014. Под ред. В.Т. Трофимова. М., Академическая наука–Геомаркетинг, 566 с.
- Глушков Б.В. 2011. Геология отложений ледникового комплекса Донского ледникового языка. *Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Геология*, 2: 40–48.
- Забураева Х.Ш. 2012. Геоэкологические проблемы землепользования в Чеченской республике. *Вестник КрасГАУ*, 5 (68): 196–200.
- Зонн С.В., Зонн И.С. 2002. Экологические последствия военных операций в Чечне. *Энергия: экономика, техника, экология*, 6–7: 50–53.
- Иоффе А.И. 2013. Метод оценки неоднородности рельефа выделенной области. *Исследование Земли из космоса*, 3: 91–94. DOI: 10.7868/S0205961413020048.
- Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Бакланов И.О., Маслова Н.В. 2020. Влияние загрязнения почв объектов авиационной и космической деятельности на здоровье человека. *Экология промышленного производства*, 4 (112): 39–44.
- Кочетова Ж.Ю., Маслова Н.В., Базарский О.В. 2022. Авиационно-ракетные кластеры и окружающая среда. М., ИНФРА-М, 266 с. DOI: 10.12737/1544137.
- Компьютеры и нелинейные явления: Информатика и современное естествознание. 1988. Под ред. А.А. Самарского. М., Наука, 192 с.
- Крюченко Н.О., Жовинский Э.Я., Панайт 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): 18–23. DOI: 10.15587/2313-8416.2015.47226.
- Кудельский А.В., Стародубова А.П., Феденя В.М., Бурак В.М. 1997. Экология территории бывших военных баз. *Литосфера*, 7: 153–166.
- 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.
- Масленников А.А., Демидова С.А. 2018. Экспериментальная оценка токсического влияния тротила на микрофлору почвы. *Токсикологический вестник*, 6 (153): 34–38. DOI: 10.36946/0869-7922-2018-6-34-38.
- Сафонич И.Н., Колесникова С.И. 2011. Сейсмический эффект взрывов на полигоне «Погоново». В кн.: Современные методы обработки интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы, 15–19 августа 2011, Апатиты, Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук»: 303–307.
- 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.
- Харькина М.А. 2004. Экологические последствия военных действий. *Энергия: экономика, техника, экология*, 7: 56–59.
- Хусаинова Р.З., Чуйков Ю.С. 2013. Проблемы экологической безопасности и безопасности персонала и населения при утилизации непригодных к использованию боеприпасов. Обзор. *Астраханский вестник экологического образования*, 2 (24): 156–169.
- Douglas T.A., Walsh M.E., McGrath K.J., Weiss K.A., Jaramillo A.M., Trainor T.P. 2010. Desorption of nitramine residues and nitroaromatic explosives from soils detonated under controlled conditions. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 30 (2): 345–353. DOI: 10.1002/etc.383.
- Jenkins T.F., Hewitt A.D., Grant C.L., Thiboutot S., Ampleman G., Walsh M.E., Ranney T.A., Ramsey Ch.A., Palazzo A.J., Pennington J.C. 2006. Identity and distribution of residues of energetic



compounds at army live-fire training ranges. *Chemosphere*, 63 (8): 1280–1290. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.09.066.

Pennington J.C., Brannon J.M. 2002. The Ecological Fate of explosives. *Thermochimica Acta*, 384 (1–2): 163–172. DOI: 10.1016/S0040-6031(01)00801-2.

Mathematics Differential and Integral Equations, Dynamical Systems and Control Theory, Mathematical Physics. Series: Cambridge Texts in Applied Mathematics. 1994. Cambridge University Press, 240 p. DOI: 10.1017/CBO9780511626296.

References

- Bazarskiy O.V., Kochetova Zh.Yu. 2021. Entropy of abiotic geospheres and a model for assessing and predicting their state. *Biosphere*, 13 (1–2): 9–14 (in Russian). DOI: 10.24855/biosfera.v13i1.572.
- Geologicheskoe prostranstvo kak ekologicheskij resurs i ego transformaciya pod vliyaniem tekhnogeneza [Geological space as an ecological resource and its transformation under the influence of technogenesis]. 2014. Ed. by V.T. Trofimov. Moscow, Pabl. Akademicheskaya nauka–Geomarketing, 566 p.
- Glushkov B.V. 2011. The Geology of the Glacial Complex Deposits of the Don Glacial Tongue. Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology, 2: 40–48 (in Russian).
- Zaburaeva H.S. 2012. Geoecological problems of land use in the Chechen Republic. *Bulletin of KSAU*, 5:196-200. (in Russian)
- Zonn S.V., Zonn I.S. 2002. Ekologicheskie posledstviya voennyh operacij v Chechne [Environmental consequences of military operations in Chechnya]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 6–7: 50–53.
- Ioffe A.I. 2013. Method for Estimation of a Given Area Relief Roughness. *Earth Observation and Remote Sensing*, 3: 91–94 (in Russian). DOI:10.7868/S0205961413020048.
- Kochetova Zh.Yu., Bazarsky O.V., Baklanov I.O., Maslova N.V. 2020. Impact of Priority Contaminants of Aviation and Space Activities on Human Health. *Industrial Ecology*, 4 (112): 39–44 (in Russian).
- Kochetova Zh.Yu., Maslova N.V., Bazarskij O.V. 2022. Aviacionno-raketnye klastery i okruzhayushchaya sreda: monografiya [Aviation and missile clusters and the environment: monograph]. Moscow, Pabl. INFRA-M, 266 p. DOI: 10.12737/1544137.
- Komp'yutery i nelinejnye yavleniya: Informatika i sovremennoe estestvoznanie [Computers and nonlinear Phenomena: Computer Science and Modern Natural Science]. 1988. Ed. by A.A. Samarskogo. Moscow, Pabl. Nauka, 192 p.
- Kryuchenko N.O., Zhovinsky E.Ya., Panait E.V., Andrievskaya E.A. 2015. 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). *SCIENCREISE*, 7 (1): 18–23 (in Russian). DOI: 10.15587/2313-8416.2015.47226.
- Kudelsky A.V., Starodubova A.P., Fedenyva V.M., Burak V.M. 1997. Ecology of the territory of former military bases. *Lithosfera*, 7: 153–166 (in Russian).
- Trofimov V.T., Kharkina M.A., Zhigalin A.D., Baraboshkina T.A. 2019. Technogenic transformation of ecological functions of abiotic spheres of the Earth under the influence of military activity. *Moscow University Geology Bulletin*, 1: 3–13 (in Russian).
- Maslennikov A.A., Demidova S.A. 2018. Experimental Assessment of Toxic Effects of Trotyl (Tnt) on Soil Microflora. *Toxicological Review*, 6 (153): 34–38 (in Russian). DOI: 10.36946/0869-7922-2018-6-34-38.
- Safronich I.N., Kolesnikova S.I. 2011. Sejsmicheskij effekt vzryvov na poligone «Pogonovo» [Seismic effect of explosions at the Pogonovo landfill]. In: Sovremennyye metody obrabotki interpretatsii seysmologicheskikh dannykh [Modern methods for processing the interpretation of seismological data]. Proceedings of the Six International Seismological School, 15–19 August 2011, Apatity, Pabl. Federal'nyj issledovatel'skij centr «Edinaya geofizicheskaya sluzhba Rossijskoj akademii nauk»: 303–307.
- Smurygin A.V., Bakin E.N., Aseev V.A. 2019. Osobennosti ekologicheskogo obespecheniya v Vooruzhennyh Silah Rossijskoj Federacii [Features of environmental support in the Armed Forces of the Russian Federation]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*, 1 (10): 393–395.

- Har'kina M.A. 2004. Ekologicheskie posledstviya voennyh dejstvij [Environmental consequences of military actions]. Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya, 7: 56–59.
- Husainova R.Z., Chujkov Yu.S. 2013. The Problems of Environmental Safety and Security of Personnel and the Public when Disposing of an Unserviceable Ammunition. Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya, 2 (24): 156–169 (in Russian).
- Douglas T.A., Walsh M.E., McGrath K.J., Weiss K.A., Jaramillo A.M., Trainor T.P. 2010. Desorption of nitramine residues and nitroaromatic explosives from soils detonated under controlled conditions. Environmental Toxicology and Chemistry, 30 (2): 345–353. DOI: 10.1002/etc.383.
- Jenkins T.F., Hewitt A.D., Grant C.L., Thiboutot S., Ampleman G., Walsh M.E., Ranney T.A., Ramsey Ch.A., Palazzo A.J., Pennington J.C. 2006. Identity and distribution of residues of energetic compounds at army live-fire training ranges. Chemosphere, 63 (8): 1280–1290. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.09.066.
- Pennington J.C., Brannon J.M. 2002. The Ecological Fate of Explosives. Thermochimica Acta, 384 (1–2): 163–172. DOI: 10.1016/S0040-6031(01)00801-2.
- Mathematics Differential and Integral Equations, Dynamical Systems and Control Theory, Mathematical Physics. Series: Cambridge Texts in Applied Mathematics. 1994. Cambridge University Press, 240 p. DOI: 10.1017/CBO9780511626296.

Поступила в редакцию 02.11.2021;
поступила после рецензирования 29.11.2021;
принята к публикации 17.12.2021

Received November 2, 2021;
Revised November 29, 2021;
Accepted December 17, 2021

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

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

Пантелейев Дмитрий Александрович, старший 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», г. Воронеж, Россия

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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