

УДК 504.064.2

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-2-221-235

## Анализ экологической безопасности военных полигонов по факторам рельефа и геохимического загрязнения почв

<sup>1</sup>Пантелеев Д.А., <sup>1</sup>Базарский О.В., <sup>1</sup>Кочетова Ж.Ю., <sup>2</sup>Анциферова Г.А., <sup>3</sup>Ларионов А.Н.

<sup>1</sup>ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

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

<sup>2</sup>ВГУ «Воронежский государственный университет»,

Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

<sup>3</sup>ВГАУ «Воронежский государственный аграрный университет»,

Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, 1

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

**Аннотация.** Военная деятельность наносит огромный вред экологическому состоянию окружающей среды. Особое место в данном случае занимают военные полигоны, на которых испытывается и применяется огромное количество различного оружия. Поэтому для оценки экологического ущерба и планирования мероприятий по регенерации почвенного покрова актуальна разработка новых подходов к прогнозированию развития экологической ситуации на территориях объектов военной деятельности. Существующие методы и нормативы непригодны для оценки экологической безопасности почв при воздействии нескольких факторов, оказывающих влияние на их деградацию. В данном случае под деградацией почв понимается трехмерное изменение рельефа территории с вариациями по глубине не более 10 м (воронки от взрывов) и ее геохимическое загрязнение. В основу методики положена модифицированная рекуррентная модель Ферхюльста, используемая в разных областях знаний для описания систем динамического хаоса. Для оценки и прогноза состояния экологических систем используется понятие, предложенное авторами ранее, – геоэкологическая энтропия, которая изменяется в интервале  $[0, 4]$  и определяет уровень их устойчивости в диапазоне от 0 до 1. Методика апробирована на участке типичного авиационного полигона в Центральном федеральном округе. Показано, что его многофакторная экологическая безопасность в целом находится на низком уровне (компенсируемый экологический кризис). Сделан прогноз развития экологической ситуации на полигоне на ближайшие 30 лет. Даны рекомендации по проведению реабилитации почвенного покрова авиационного полигона. Цель настоящего исследования – построение многофакторной методики оценки физической и химической деградации почв в результате военных действий.

**Ключевые слова:** энтропия, модель, военные полигоны, деградация рельефа, загрязнение почв, цифровые карты, воронки от взрывов, тяжелые металлы

**Для цитирования:** Пантелеев Д.А., Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю., Анциферова Г.А., Ларионов А.Н. 2024. Анализ экологической безопасности военных полигонов по факторам рельефа и геохимического загрязнения почв. Региональные геосистемы, 48(2): 221–235. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-2-221-235

---

## Analysis of the Environmental Safety of Military Landfills by Factors of Relief and Geochemical Soil Pollution

<sup>1</sup>Dmitry A. Pantelev, <sup>1</sup>Oleg V. Bazarskii, <sup>1</sup>Zhanna Yu. Kochetova,

<sup>2</sup>Galina A. Antsiferova, <sup>3</sup>Alexey N. Larionov

<sup>1</sup>Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin",

54A Starykh Bol'shevikov St, Voronezh 394064, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State University,

1 University Sq, Voronezh 394018, Russia

<sup>3</sup>Voronezh State Agrarian University,

1 Michurina St, Voronezh 394087, Russia

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

**Abstract.** Military activities have a huge impact on the ecological state of the environment. A special place in this case is occupied by military ranges, where a huge number of different weapons and armaments are tested



and used. Therefore, for assessment environmental damage and planning measures for the regeneration of soil cover, it is relevant to develop new approaches to forecasting the development of the environmental situation in the territories of military facilities. The existing methods and standards are unsuitable for assessing the environmental safety of soils when exposed to several factors affecting their degradation. In this case, soil degradation refers to a three-dimensional change in the terrain of the territory with variations in depth of no more than 10 m (craters from explosions) and its geochemical contamination. The methodology is based on a modified recurrent Ferhulst model used in various fields of knowledge to describe dynamic chaos systems. To assess and forecast the state of ecological systems, the concept proposed by the authors earlier is used – geocological entropy, which varies in the range [0, 4] and determines the level of their stability in the range from 0 to 1. The technique has been tested on a site of a typical aviation landfill in the Central Federal District. It is shown that its multifactorial environmental safety is generally at a low level (compensated environmental crisis). A forecast of the development of the environmental situation at the landfill for the next 30 years has been made. Recommendations are given for the rehabilitation of the soil cover of the aviation landfill. The purpose of this study is to build a multifactorial methodology for assessing the physical and chemical degradation of soils as a result of military operations.

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

**For citation:** Pantelev D.A., Bazarsky O.V., Kochetova Zh.Yu., Antsiferova G.A., Larionov A.N. 2024. Analysis of the Environmental Safety of Military Landfills by Factors of Relief and Geochemical Soil Pollution. *Regional geosystems*, 48(2): 221–235. (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-2-221-235

## Введение

Математическая модель для описания процессов динамического хаоса предложена бельгийским математиком Пьером Франсуа Ферхюльстом. Согласно этой модели, малые ошибки предыдущих детерминированных циклов накапливаются, что приводит к скачкообразному переходу системы от динамического развития системы к хаотическому [Lorenz, 1963; Feigenbaum, 1978]. Уравнение Ферхюльста успешно применяется для описания гидродинамических и метеорологических процессов, характеризующихся неустойчивостью к незначительным изменениям начальных условий на больших рядах наблюдений. При этом существует «горизонт прогноза», когда динамическое развитие системы сменяется хаотическим и предсказать ее поведение становится невозможным [Лоренц, 1981]. Геоэкологические процессы с позиций динамического хаоса изучены мало, однако некоторые авторы считают перспективным развитие этого нового направления в экологии [Розенберг, 2011; Сугак, 2014].

Ранее предложена и исследована энтропийная модель динамического хаоса для оценки экологической безопасности антропогенно измененных систем [Базарский, Кочетова, 2021; Базарский и др., 2023]. При малых уровнях деградации окружающей среды ее энтропия мала, система является детерминированной, абсолютно предсказуемой, при этом ее экологическая безопасность максимальна (близка к единице). При увеличении деградации система становится стохастической, а уровень ее экологической безопасности можно предсказать с некоторой вероятностью. При значительных уровнях деградации наступает первая бифуркация, когда система самопроизвольно может улучшить или ухудшить свое экологическое состояние с вероятностями 0,5. При дальнейшем увеличении техногенной нагрузки система переходит в хаотическое состояние с множеством бифуркаций, становится абсолютно непредсказуемой, и ее экологическая безопасность стремится к нулю.

Деградация почв военных полигонов и территорий боевых действий происходит под влиянием множества факторов, основными из которых являются физическое изменение рельефа и химическое загрязнение почв токсичными веществами. Применение современного мощного оружия в течение даже незначительного времени приводит к катастрофическим последствиям для экосистем, масштабные территории надолго становятся непригодными для ведения хозяйственной деятельности [Зонн и др., 2002; Харьковина, 2004; Кочетова и др., 2023]. Методики оценки экологической безопасности антропогенно нагруженных территорий при многофакторной их деградации не существует, хотя в свете современных войн с использованием средств поражения высокой мощности эта проблема является чрезвычайно актуальной [Дрозд, 2023].

Предложенная авторами модель базируется на новом понятии – «геоэкологическая энтропия». Для ее оценки статистический ряд экологических измерений разбивается на несколько градаций. Энтропия каждой градации рассчитывается как произведение повторяемости градаций на логарифмы коэффициентов опасности градации. Коэффициенты опасности определяются по стандартным методикам как соотношение измеренных значений (концентраций токсикантов, площадей нарушенных земель) на их фоновые уровни, характерные для исследуемой территории [Рычагов, 2018; СанПиН 1.2.3685-21]. Область определения геоэкологической энтропии лежит в пределах от нуля до четырех. Уровень экологической безопасности системы рассчитывается по модифицированному соотношению Ферхюльста, где управляющим параметром является геоэкологическая энтропия [Компьютеры..., 1988].

На примере авиационной части военного полигона с применением построенной энтропийной модели динамического хаоса оценены уровни экологической безопасности деградации рельефа и химического загрязнения почв по отдельности, что подробно изложено в работах [Базарский и др., 2022; Пантелеев и др., 2023].

### Объекты и методы исследования

Полигон «Погоново» находится на расстоянии 10 км от г. Воронежа. Общая площадь полигона составляет 300 га. Он расположен в междуречье рек Воронеж и Дон, в средней его части проходит водораздел. Грунт полигона по максимальной глубине воронок – мелкозернистый песок, характеризующийся низкой устойчивостью по склонам. Полигон находится в заповедном лесу между миллионным городом Воронежем и «воронежским Байкалом» – озером Погоново (рис. 1). Озеро входит в число памятников природы Воронежской области, в нем в изобилии водились окунь, серебряный карась, плотва, лещ, сазан, щука, судак. Среди водоплавающих птиц обитали чайки, цапли и множество других редких птиц. В 1970-х годах на берегу озера располагалась усадьба рыбного хозяйства.

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 (рис. 2). Гряда простирается с севера на 180 км от с. Хлевное Липецкой обл. до устья реки Икорец, проходит по водоразделу р. Дон и р. Воронеж. По левобережью р. Дон и к югу от устья р. Икорец гряда 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 [Глушков, 2011].

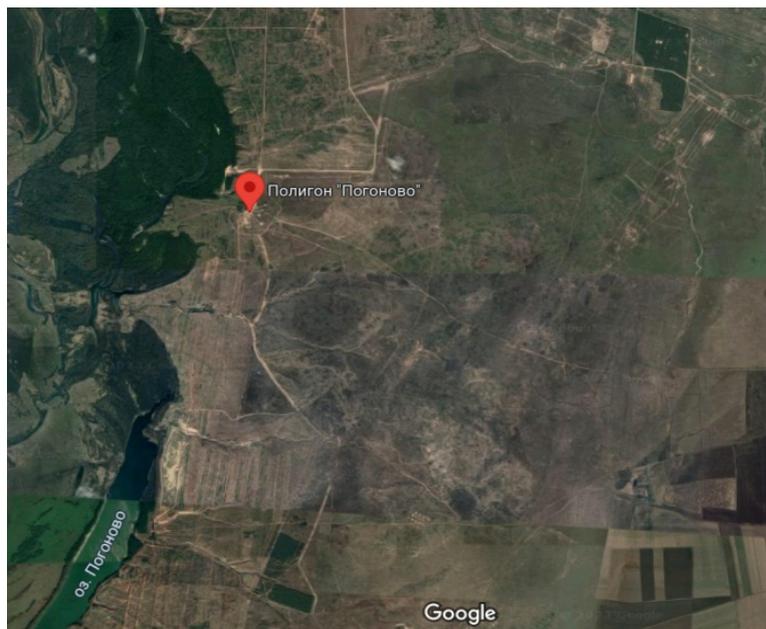


Рис. 1. Расположение полигона «Погоново», г. Воронеж

Fig.1. Location of the Pogonovo landfill, Voronezh

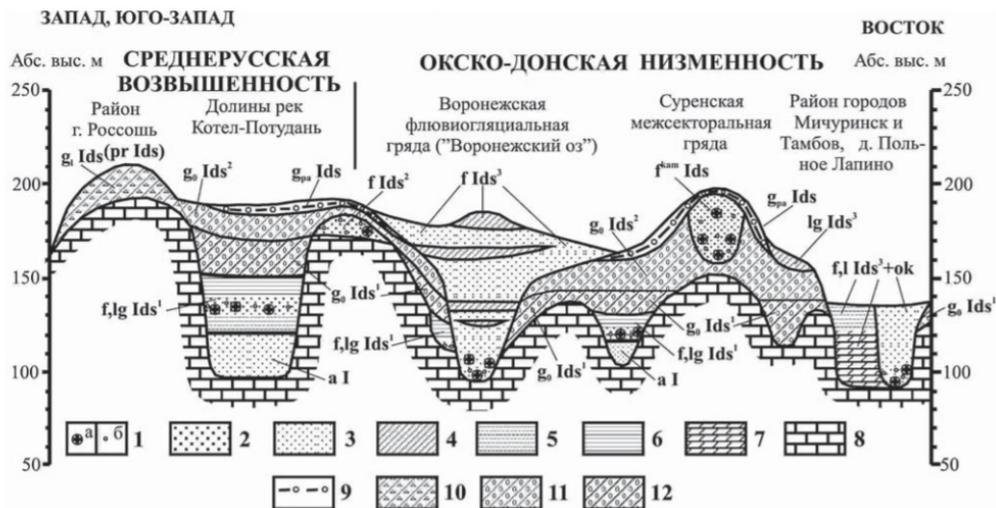


Рис. 2. Условия залегания донских ледниковых и связанных с ними отложений в бассейне Верхнего Дона: 1а – галька и валуны дальнепринесенных пород, 1б – галька; 2 – пески разномерности; 3 – пески средне- и мелкозернистые; 4 – суглинки; 5 – глины; 6 – глины ленточные; 7 – мергели пресноводные; 8 – додонские (преимущественно дочетвертичные) породы; 9 – поверхностная морена; 10 – локальная морена; 11 – основная морена; 12 – базальная морена

Fig. 2. Conditions of occurrence of Don glacial and associated sediments in the Upper Don basin: 1a – pebbles and boulders of long-range rocks, 1b – pebbles; 2 – sand of various grains; 3 – medium- and fine-grained sands; 4 – loams; 5 – clays; 6 – ribbon clays; 7 – freshwater marls; 8 – Dodonian (mainly pre-Quaternary) rocks; 9 – surface moraine; 10 – local moraine; 11 – main moraine; 12 – basal moraine

Западный склон сложен песками мощностью до 80 м, к востоку они сменяются суглинками. Подошва тела гряды слабоогнутая и изменяется от +100 метров до +70–80 м. Севернее с. Хлевное гряда переходит в моренные образования, а южнее Павловска – в долинный зандр. Образование вала происходило в глубоком каньоне с ледовыми бортами, проложенном тальми водами по направлению стока, близкому к доледниковой долине. После таяния льда флювиогляциальное тело стало иметь вид возвышенной гряды. 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.

В экологической геохимии интересен момент, который может быть интерпретирован с точки зрения парагенезиса мышьяка с природными процессами. Это сульфидная свинцовая и медная минерализация, обнаруженная в меловых породах в одном из оврагов возле села Костенки. Как известно, рудная минерализация меди, свинца и мышьяка в природе – дело обычное. Однако, чтобы подтвердить данную гипотезу требуется проведение в этом районе геохимической съемки. В качестве рабочей гипотезы не опровергается и версия мышьякового загрязнения, источником которого может оказаться полигон «Погоново». Негативная сторона функционирования полигона может быть связана и с техногенным инициированием эрозионных процессов на участках, где плотно сгруженные воронки группируются в узкие зоны, вытянутые по склону. В весеннее половодье, когда воронки переполняются внешними 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-балочной системы, показан на рис. 3.



Рис. 3. Поверхностный сток с участка с взрывными воронками может быть направлен к циркумменту, от которого начинается водоток Карпичихино Лога на север в сторону водохранилища

Fig. 3. Surface runoff from the site with explosive craters can be directed to the circus of the moment, from which the Karpichikhin Log watercourse begins to the north towards the reservoir

### *Энтропийная модель оценки экологической безопасности военных полигонов*

Существующая методика оценки экологической безопасности сформулирована в методических документах: «Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве» № 5174-90 [МУ 2.1.7.730-99]. «Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест» М.: ФГБУ «ЦСП» ФМБА России.

Методика основана на вычислении суммарного показателя загрязнения (далее – СПЗ) территории. Вычисляется коэффициент опасности ЗВ

$$K_c = C_k / ПДК_k,$$

где  $C_k$  – измеренная концентрация ЗВ,  $ПДК_k$  – его предельно допустимая концентрация. Учитываются только  $K_c > 1$ .

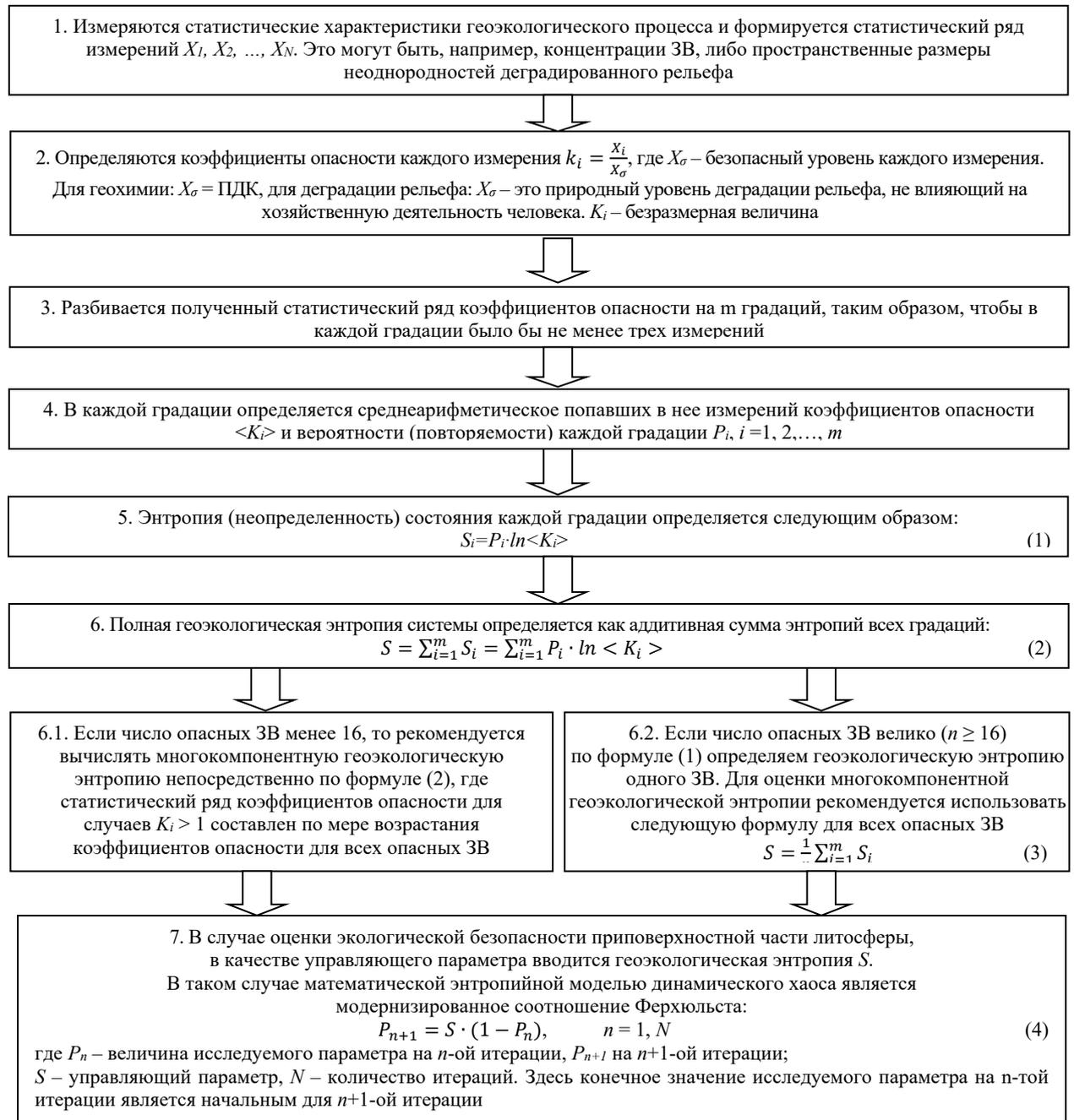
Эти показатели являются дифференциальными, так как пробы отбираются в отдельных точках и не могут характеризовать экологическую безопасность территории в целом. Поэтому необходимо разработать универсальную модель оценки экологической безопасности территории, которая сможет учитывать статистическую неопределенность оценки экологической безопасности территории для деятельности человека при всех возможных факторах и уровнях деградации территории.

Универсальной величиной, определяющей меру неопределенности (беспорядка), возникающей в статистической системе, является энтропия. Она зависит от числа возможных состояний системы  $W$ . Чем больше эта величина, тем больше энтропия и неопределенность состояния системы. Для придания аддитивности этому показателю число состояний измеряется в логарифмическом масштабе, то есть используется величина  $\ln W$ . Таким образом, если число состояний системы строго определено, то она является детерминированной и  $W = 1$ , и  $\ln W = 0$ .



Для построения энтропийной модели в начале необходимо ввести новое понятие «геоэкологическая энтропия», которое отличается от энергетического понятия «энтропия» в физике. Алгоритм вычисления геоэкологической энтропии разработан в пунктах 1–7.

Энтропийная модель динамического хаоса оценки и прогноза экологической безопасности техногенно нагруженных территорий:



В данной модели геоэкологическая энтропия всегда ограничена как снизу, так и сверху, и бесконечно не возрастает с увеличением  $n$ , как это происходит при вычислении СПЗ.

Разработанная модель является универсальной, пригодной для оценки энтропии любого техногенного воздействия на почву. Отличия будут заключаться только в вычислении коэффициентов опасности, которые в широком смысле вычисляются как отношение измеренной деградации к ее уровню, безопасному для человека.

Для оценки экологической безопасности территорий при различных уровнях техногенной нагрузки использована модель динамического хаоса, описывающая переход системы

от детерминированного состояния, описываемого динамическими законами, к стохастическому, описываемому вероятностными законами, и наконец переходу в хаотическое состояние через последовательность бифуркаций, когда прогноз состояния системы становится невозможным.

Исследования уравнения (4) показали, что если  $P_n \in [0,1]$ , то геоэкологическая энтропия  $S$  не выходит за пределы интервала  $[0,4]$  и ограничена как снизу, так и сверху указанными значениями.

На рис. 4 приведена бифуркационная номограмма развития неустойчивости экологической системы  $P_n$ , рассчитанная по формуле (4), для числа итераций (циклов)  $n = 64$ . Одна итерация принята равной одному году, в течение которого усредняется за счет климатических изменений геоэкологическая энтропия. Поскольку экологическая неустойчивость  $P_n$  характеризует экологическую опасность деградированной территории, то величина  $(1 - P_n)$  определяет экологическую безопасность территории.

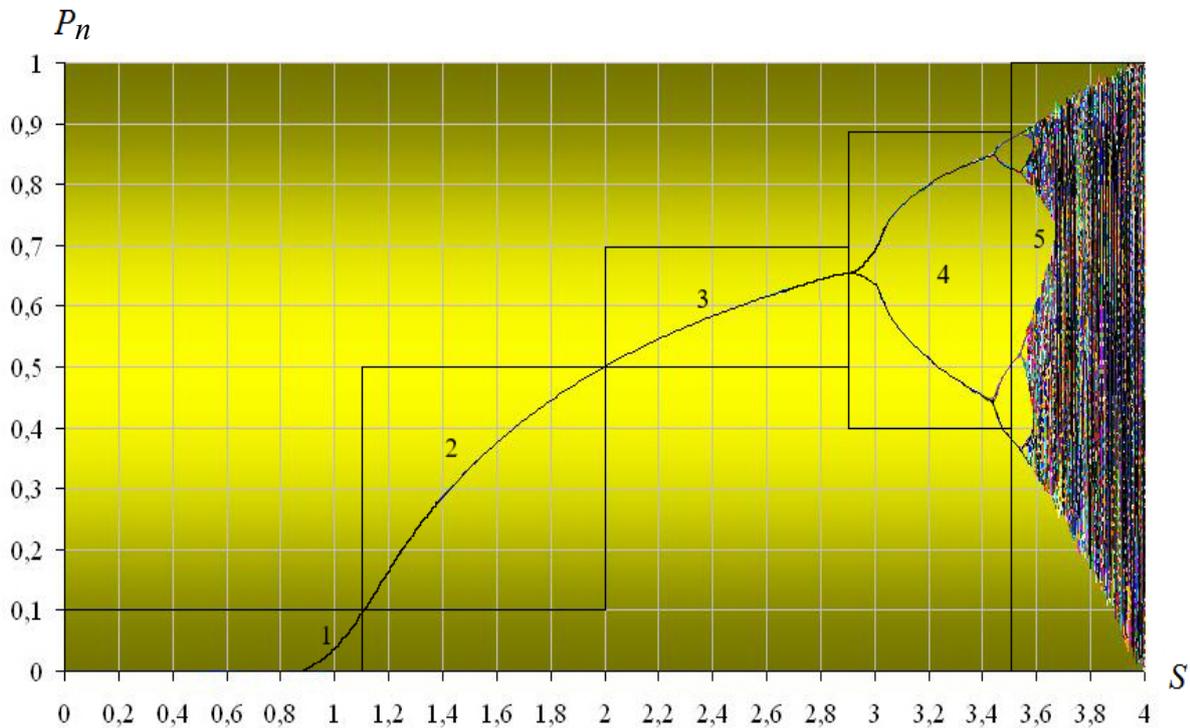


Рис. 4 – Номограмма неустойчивых состояний экологической системы  $P_n$  в зависимости от текущей энтропии  $S$  и времени наблюдений,  $N = 64$ :

- 1 – экологическая норма; 2 – экологический риск; 3 – компенсируемый риск;
- 4 – некомпенсируемый риск; 5 – бедствие [Mathematics Differential ..., 1994]

Fig. 4. Nomogram of unstable states of the ecological system  $P_n$  depending on the current entropy  $S$  and the time of observations,  $N = 64$ : 1 – environmental standard; 2 – environmental risk; 3 – compensable risk; 4 – uncompensated risk; 5 – disaster [Mathematics Differential ..., 1994].

При рассмотрении бифуркационных номограмм, модель зависимости оценки неустойчивости экологической системы зависит от числа итераций  $N$ . Поскольку начальный уровень неустойчивости исследуемой системы в прошлом неизвестен, то принято, что он был незначительным, когда экологическая безопасность системы была не менее 0,95, то есть возможная ошибка не более 0,05.

Приемлемая точность возникает при  $N \geq 16$ , а бифуркационная номограмма полностью стабилизируется при 64 годах техногенной эксплуатации экологической системы. Здесь до уровня первой бифуркации  $S = 2,9$  возможен прогноз состояния экологической системы при мониторинге ее текущей энтропии. Таким образом, для оценки точности



прогноза текущей экологической безопасности техногенно нагруженной системы необходимо знать время начала ее эксплуатации.

Полигон «Погоново» эксплуатируется уже в течение 70 лет, и для оценки его экологической безопасности можно пользоваться диаграммой, приведенной на рис. 1, измеряя текущую геоэкологическую энтропию  $S$ . Шкала ранжирования номограммы сведена в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1

Степени экологической деградации геоэкологических систем  
 The degree of environmental degradation of geoeological systems

S	P	Градация	Характеристика градации
$0 \leq S < 1,1$	$0 \leq P < 0,1$	ЭН	Уровень техногенного воздействия не превышает порога опасности
$1,1 \leq S < 2$	$0,1 \leq P < 0,5$	ЭР	Уровень техногенного воздействия превышает порог опасности, но протекционные системы человека справляются с этой нагрузкой. Система находится в устойчивом динамическом равновесии
$2,0 \leq S < 2,9$	$0,5 \leq P < 0,7$	КК	Переходный процесс из устойчивого равновесия в неустойчивое. Интенсивное накопление загрязняющих веществ в организме человека
$2,9 \leq S < 3,5$	$0,7 \leq P < 0,88$ $0,4 \leq P < 0,7$	НК	За счет первой бифуркации система переходит в состояние динамического хаоса, возможны два непредсказуемых пути ее развития, со случайным увеличением или уменьшением устойчивости (риска)
$3,5 \leq S \leq 4,0$	$0,88 \leq P \leq 1,0$	ЭБ	Множественные бифуркации. Система находится в состоянии абсолютного хаоса. Живые организмы на таких территориях погибают. Однако при $S = 3,77$ существует «окно», в котором возможно выживание приспособившейся части старой популяции и зарождение новой

Таким образом, разработанная модель позволит сделать оценку состояния геоэкологических систем в широком интервале степени их деградации, начиная от детерминированного состояния системы, когда степень ее деградации мала, затем при увеличении энтропии система становится стохастической, когда описать ее состояние с помощью вероятностного подхода еще возможно и при дальнейшем увеличении энтропии возникают множественные бифуркации, когда экологическая система переходит в хаотическое состояние, при котором прогноз ее состояния становится невозможным.

Разработанная методика является универсальной и может быть использована для оценки геоэкологической энтропии любого техногенного воздействия на почвы, только в каждом конкретном случае необходимо разработать способ вычисления коэффициентов опасности.

### ***Энтропия физической деградации почв полигона***

База данных неровностей рельефа исследуемого авиационного полигона сформирована путем рекогносцировки местности по аэрофотоснимкам с беспилотного летательного аппарата. Разрешающая способность фотоаппаратуры 0,25 м. С помощью программы *Agisoft Metashape Professional* проводили обработку снимков территории полигона площадью  $600 \times 600 \text{ м}^2$ , который показан на рис. 5. На этой территории определено количество воронок  $N = 362$ , диаметры  $D$  которых варьировались от 2 до 26 м, а глубина достигала 6 м. Данные статистической обработки участка полигона представлены в табл. 2.

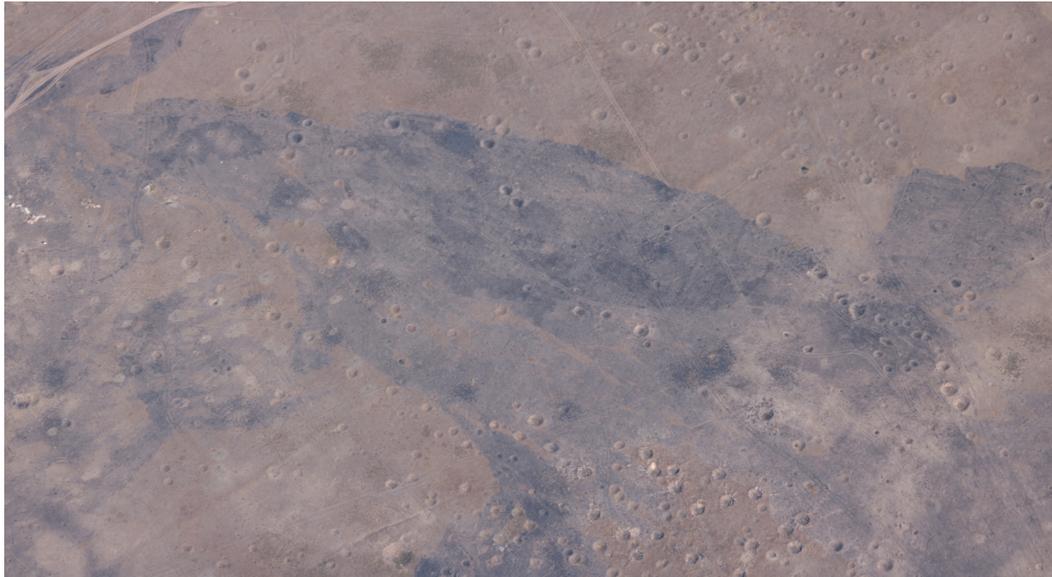


Рис. 5. Снимок территории полигона  
Fig.5. A snapshot of the polygon's territory

Таблица 2  
Table 2

Статистические данные деградации рельефа полигона  
Statistical data on terrain degradation the polygon

№ градации	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
$D_{icp}, м$	3,1	5,0	6,8	8,8	11	12,8	15,2	17,1	18,9	20,7	22,9	25,5
$P_{ид}$	0,28	0,31	0,13	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	0,01	0,03	0,02	0,01
$\langle K_{ид} \rangle$	1,55	2,50	3,40	4,40	5,50	6,40	7,60	8,55	9,45	10,4	11,4	12,8
$\ln K_{ид}$	0,44	0,92	1,22	1,48	1,70	1,86	2,03	2,15	2,25	2,34	2,44	2,55
$S_{ид}$	0,12	0,28	0,16	0,04	0,07	0,07	0,12	0,09	0,02	0,07	0,05	0,04

В зависимости от диаметра воронки разделены на 12 градаций. Результаты обработки данных приведены в табл. 2, где указаны: средний диаметр воронок в  $i$ -той градации ( $D_{icp}$ ); повторяемость градации ( $P_{ид}$ ), рассчитанная как отношение числа воронок  $n_i$  в  $i$ -той градацию к общему числу воронок  $N$ ; средний коэффициент опасности градации ( $\langle K_{ид} \rangle$ ), рассчитывается как соотношение среднего диаметра воронок  $D_{icp}$  в  $i$ -той градации на безопасный природный диаметр неоднородностей рельефа, принятый равным 2 м [Рычагов, 2018]; геоэкологическая энтропия каждой градации  $S_{ид}$  приведена в последней строке.

Полная энтропия рассматриваемого участка полигона рассчитывается по формуле [Базарский и др., 2022]:

$$S_d = \sum_{i=1}^m P_{ид} \cdot \ln \langle K_{ид} \rangle = \sum_{i=1}^m S_{ид}, \quad (2)$$

где  $m$  – число градаций.

Рассчитанное значение энтропии  $S_d = 1,13$  соответствует рангу «экологический риск» по нормативной шкале опасностей деградации объектов окружающей среды, как указано на рис. 4 [Базарский и др., 2022].



### Энтропия геохимической деградации почв полигона.

При трехмерной деградации рельефа в каждой воронке необходимо отбирать девять проб: одну на дне, четыре по склонам и четыре на кромке воронки [Пантелеев и др., 2023]. Проводить химический анализ загрязнения почв полигона по всем 362 воронкам экономически не целесообразно. Поэтому была разработана косвенная методика оценки геохимической деградации полигона, состоящая из этапов.

1. На полигоне выбирали пять эталонных воронок с различными диаметрами, соответствующими рангам 1–5, как указано в табл. 3. В каждой из выбранных воронок отбирали девять проб, делали из них объединенную пробу. Анализ объединенных проб из каждой воронки проводили методом рентгеновской спектрометрии. Установлены средние концентрации следующих элементов: *Sn, Cs, Sc, Nb, Ga, Y, Zr, Sr, Rb, Ba, Ti, As, Pb, Co, Sb, Cu, Ni, Zn, Cr, V, Mn, Fe* [Пантелеев и др., 2023].

2. Рассчитаны коэффициенты опасности элементов путем деления средней концентрации элемента на П(О)ДК вещества в почве [СанПиН 1.2.3685-21]. Элементы с коэффициентами опасности  $\leq 1$  в дальнейших расчетах не учитывали. Установлено 15 опасных загрязняющих элементов в воронках от авиационных снарядов: *Cu, Ni, Zr, Sr, Rb, Mn, Sn, Cr, Ba, Sc, Pb, Sb, Ga, Cs, Nb*.

3. Повторяемость каждой градации  $P_{ix}$  оценивали как отношение числа коэффициентов опасности  $n_i$ , попавших в  $i$ -тую градацию, к общему числу коэффициентов опасности:  $P_{ix} = n_i/N$ , где  $N = 15 \cdot 5 = 75$ .

Таблица 3  
Table 3

Статистические показатели деградации рельефа и химического загрязнения почв в каждой градации 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	$M$	
Химическое загрязнение почв полигона	$\langle K_{ix} \rangle$	1,43	2,33	4,75	6,1	8,49		
	$P_{ix}$	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	$\langle K_{id} \rangle$	2,7	5,4	8,3	9,9	11,8		
	$P_{id}$	0,36	0,13	0,24	0,17	0,1		
	$M_{id}$	0,97	0,7	2,0	1,69	1,18	6,54	
	$M_{id} - M_{ix}$		$d_i$	0,492	0,234	1,008	1,281	0,518

Средний коэффициент опасности градации  $\langle K_{ix} \rangle$  определяли как среднеарифметическое всех коэффициентов, попавших в  $i$ -тую градацию.

Энтропию химического загрязнения почв рассчитывали аналогично по формуле (2):

$$S_{ix} = \sum_{i=1}^m P_{ix} \ln \langle K_{ix} \rangle = 1,15.$$

Рассчитанное значение  $S_{ix}$  также соответствует рангу «экологический риск».

Для оценки тесноты связи двух факторов, определяющих комплексную деградацию полигона, рассчитаны математические ожидания коэффициентов опасности по формуле:

$$M = \sum_{i=1}^m P_i \cdot \langle K_i \rangle \quad (3)$$

По сути,  $M_i = P_i \langle K_i \rangle$  – это экологический риск каждой градации, определяемый как произведение возможного ущерба  $\langle K_i \rangle$  на вероятность его реализации  $P_i$ . Средневзвешенный риск для всего полигона  $M = \sum_{i=1}^m M_i$ .

В последней строке вычислены разности математического ожидания  $|d_i|$  – табл. 4, для оценки тесноты связи процессов.

### **Совместная энтропия деградации почв полигона и определение комплексной экологической безопасности.**

Геоэкологическая энтропия – безразмерная величина, однако для различных форм экологических процессов она не может быть аддитивной. Это объясняется тем, что энтропия, в отличие от энергии, не является функцией состояния системы, а зависит от условий протекания процесса. Поэтому при вычислении совместной энтропии двух различных экологических процессов необходимо знать тесноту их связи.

Теснота связи двух ранжированных случайных процессов определяется ранговым коэффициентом корреляции Спирмена  $r_{12}$  [Гмурман, 2004]:

$$r_{12} = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^m d_i^2}{m^3 - m}, \quad (3)$$

где  $d$  – безразмерная величина – разность коэффициентов опасности соответствующих рангов процессов.

Поскольку коэффициент корреляции  $r_{12}$  изменяется в пределах от +1 (автокорреляция) до –1 (разнонаправленные подобные процессы), то необходим переход в векторное пространство признаков. Тогда  $\vec{S}_1$  – полный вектор энтропии физической деградации рельефа, а  $\vec{S}_2$  – химической деградации. Ориентация этих векторов зависит от угла  $\alpha$  между ними, и модуль вектора совместной энтропии можно вычислить следующим образом:

$$|\vec{S}_c| = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2S_1S_2\cos\alpha} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2S_1S_2r_{12}} \quad (4)$$

Рассмотрим три частных случая.

При абсолютной корреляции ( $r_{12} = 1$ ) уровень совместного беспорядка системы определяется суммой абсолютных величин энтропии двух исследуемых процессов  $S_c = S_1 + S_2$ . Так происходит в термодинамике, когда в замкнутой системе нагретое и холодное тело принимают одинаковую температуру, и энтропия системы возрастает.

В случае  $r_{12} = 0$ ,  $\alpha = 90^\circ$  ( $\cos \alpha = 0$ ), векторы  $\vec{S}_1$  и  $\vec{S}_2$  ортогональны и процессы не коррелированы. Тогда совместная энтропия деградации почв будет иметь вид:  $S_c = (S_1 + S_2)^{1/2}$ .

Если исследуемые процессы коррелированы, но разнонаправлены, то  $r_{12} = -1$ , а  $S_c = S_1 - S_2$ , то есть их совместная энтропия уменьшается.

Используя данные табл. 3, получим коэффициент корреляции  $r_{12} = 0,85$ , что соответствует достаточно высокой тесноте прямой связи между физической и химической деградацией почв полигона. Иными словами, с увеличением диаметра воронок растет и уровень загрязнения почв в них.

Энтропия деградации рельефа полигона взята равной 1,13, так как вычисленная только по пяти эталонным воронкам дает меньшую точность.

Совместная энтропия исследуемого авиационного полигона будет вычисляться следующим образом:

$$S_c = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2S_1S_2r_{12}} = \sqrt{1,13^2 + 1,15^2 + 2 \cdot 1,13 \cdot 1,15 \cdot 0,85} = 2,19.$$

Из номограммы получаем, что для совместной энтропии полигона ( $S_c = 2,19$ )  $P_n = 0,52$ , а комплексный уровень экологической безопасности равен 0,48.

### **Результаты и их обсуждение**

Для исследованной авиационной части полигона «Погоново» получены следующие результаты:

1. Энтропия деградации рельефа  $S_d = 1,13$ . Это область экологического риска, когда еще возможно самопроизвольное возвращение экологической системы к нормальному состоянию. Неустойчивость системы  $P_n = 0,12$ , экологическая безопасность 0,88.



2. Геохимическая энтропия  $S_x = 1,15$  – начало области экологического риска, но еще близкого к норме. Устойчивость  $P_n = 0,12$ , экологическая безопасность  $0,88$ .

3. Большую опасность представляет деградация рельефа полигона за счет возможного образования овражно-балочной системы. Однако текущие уровни экологической безопасности нарушенной части полигона идентичны по обоим показателям, что подтверждается их высокой теснотой связи.

4. Особой точкой, где минимальна устойчивость системы, является точка при геоэкологической энтропии, равной 2, и уровне экологической безопасности системы  $0,5$ . В случае  $S < 2$  еще возможен надежный статистический прогноз экологической безопасности системы и возвращение ее в исходное состояние.

5. Совместная энтропия деградации рельефа полигона и геохимической деградации  $S_c = 2,19$ . При этом неустойчивость системы  $P_n = 0,52$ , а комплексный уровень экологической безопасности –  $0,48$ . В целом текущая техногенная нагрузка на полигоне высока, она приближается к области некомпенсированного кризиса, когда наступает первая бифуркация и экологическая система начинает вести себя непредсказуемо. При таком низком уровне экологической безопасности полигона, равном  $0,48$ , возможно частичное восстановление его земель только при проведении дорогостоящих реабилитационных мероприятий. Это комплексная оценка экологической ситуации на полигоне в целом.

6. Прогноз совместной экологической безопасности полигона при условии, что с 2024 года он будет выведен из эксплуатации, показан на рис. 6. При такой значительной начальной неопределенности экологического состояния полигона, равной  $0,52$ , прогноз на длительное время имеет значительные погрешности при большем числе циклических итераций. Это ограничение самой модели. Поэтому помимо начальных условий:  $S_c = 2,19$  и  $P_n = 0,52$  был задан требуемый конечный результат  $P_{нк} = 0,1$  – граница безопасной экологической нормы. Комплексный экологический риск равен  $0,9$ .

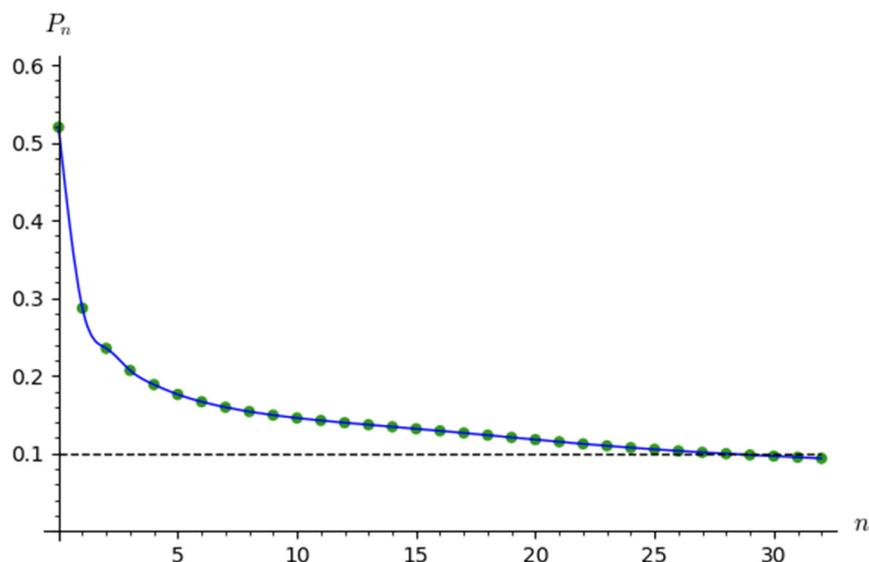


Рис. 6. Прогноз самовосстановления земель полигона  
Fig. 6. The forecast of self-restoration of the landfill lands

Граница экологической безопасности достигается за 30 лет путем самовосстановления земель полигона. Однако промежуточные точки ориентировочные, так как точно неизвестны текущие процессы, протекающие в экологически неустойчивой системе при такой существенной совместной ее деградации. Скорость самовосстановления снижается через семь лет после прекращения эксплуатации полигона. Поэтому после этого срока для достижения экологической нормы необходимо осуществлять реабилитационные меропри-

ятия, вкладывая значительные ресурсы, так как дальнейшее самовосстановление земель полигона происходит очень медленно.

### Заключение

Получено выражение для расчета совместной энтропии физической и химической деградации почв. Модель апробирована на типичном авиационном полигоне, где установлены опасность деградации рельефа в результате образования воронок от авиаснарядов и установлены 15 загрязнителей почв воронок, представляющих экологическую опасность. Установлена высокая прямая теснота связи между физической и химической деградацией почв полигона (ранговый коэффициент корреляции Спирмена 0,85). На текущий момент времени экологическая безопасность исследуемого полигона достаточно низкая. Совместная энтропия деградации почв полигона составляет 2,19, неустойчивость экологической системы 0,52, а комплексный уровень экологической безопасности – 0,48. Расчеты показали, что экологическая ситуация на исследуемом полигоне в целом приближена к рангу «некомпенсируемый кризис».

Построенная модель позволяет делать прогноз развития экологической ситуации. Горизонт прогноза ограничен переходом экологической системы из динамического в стохастическое состояние. Установлена верхняя граница экологической безопасности полигона, которая достигается за 30 лет путем самовосстановления земель. Однако промежуточные точки ориентировочные, так как точно неизвестны текущие процессы, протекающие в экологически неустойчивой системе при такой существенной совместной ее деградации. Скорость самовосстановления снижается через 7 лет после прекращения эксплуатации полигона. Поэтому после этого срока необходимо осуществлять реабилитационные мероприятия для возвращения земель полигонов в область экологической нормы.

Разработанная модель универсальна и может быть использована для интегрального описания и прогнозирования экологической ситуации различных абиотических геосфер.

### Список источников

- Гмурман В.Е. 2004. Теория вероятностей и математическая статистика. М., Высшая школа, 479 с.  
МУ 2.1.7.730-99. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. 1999. М., ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 19 с.  
Рычагов Г.И. 2018. Геоморфология. М., Юрайт, 396 с.  
СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Главный государственный санитарный врач РФ, 975 с.

### Список литературы

- Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю., Кульнев В.В., Пантелеев Д.А. 2023. Энтропийная модель динамического хаоса геоэкологической системы. Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки, 165(2): 281–294. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.2.281-294>.  
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>.  
Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю. 2021. Энтропия абиотических геосфер и модель для оценки и прогноза их состояния. Биосфера, 13(1–2): 9–14. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i1.572>.  
Глушков Б.В. 2011. Геология отложений ледникового комплекса Донского ледникового языка. Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Геология, 2: 40–48.  
Дрозд Г.Я. 2023. Физическо-механическая деградация почв вследствие военных действий в зоне проведения специальной военной операции. Вести автомобильно-дорожного института, 4(47): 24–33.



- Зонн С.В., Зонн И.С. 2002. Экологические последствия военных операций в Чечне. Энергия: экономика, техника, экология, 6–7: 50–53.
- Компьютеры и нелинейные явления: Информатика и современное естествознание. 1988. Под ред. А.А. Самарского. М., Наука, 192 с.
- Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Пантелеев Д.А. 2023. Экология почв военных полигонов. Воронеж, Научная книга, 184 с.
- Лоренц Э. 1981. Детерминированное непериодическое течение. В кн.: Странные аттракторы. М., Мир: 88–117.
- 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. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-607-618>
- Розенберг Г.С. 2011. Экология и кибернетика: по следам Маргалёфа. Биосфера, 3(4): 445–454.
- Сугак Е.В. 2014. Современные методы оценки экологических рисков. Европейский журнал социальных наук, 5–2(44): 427–433.
- Харькина М.А. 2004. Экологические последствия военных действий. Энергия: экономика, техника, экология, 7: 56–59.
- Lorenz E.N. 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. Journal of the Atmospheric Sciences, 20(2): 130–141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2).
- Feigenbaum M. 1978. Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations. Journal of Statistical Physics, 19(1): 25–52. <https://doi.org/10.1007/BF01020332>.
- Mathematics Differential and Integral Equations, Dynamical Systems and Control Theory, Mathematical Physics. Series: Cambridge Texts in Applied Mathematics. 1994. Cambridge University Press, 240 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626296>.

## References

- Bazarsky O.V., Kochetova Zh.Yu., Kulnev V.V., Panteleev D.A. 2023. Entropy Model of Dynamic Chaos of an Abiotic System. Scientific notes of Kazan University. Series: Natural Sciences, 165(2): 281–294 (in Russian). <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.2.281-294>.
- Bazarsky O.V., Panteleev D.A., Kochetova J.Y. 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>.
- Bazarskiy O.V., Kochetova Zh.Yu. 2021. Entropy of Abiotic Geospheres and a Model for Assessing and Forecasting Their States. Biosphere, 13(1–2): 9–14 (in Russian). <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i1.572>.
- 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).
- Drozd G.Ya. 2023. Physical and Mechanical Degradation of Soils due to Military Operations in the Special Military Operation Zone. Bulletin of the Automobile and Highway Institute, 4(47): 24–33.
- Zonn S.V., Zonn I.S. 2002. Ekologicheskie posledstviya voennykh operacij v Chechnya [Environmental Consequences of Military Operations in Chechnya]. Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya, 6–7: 50–53.
- Komp'yutery i nelinejnye yavleniya: Informatika i sovremennoe estestvoznaniye [Computers and Nonlinear Phenomena: Computer Science and Modern Natural Science]. 1988. Ed. by A.A. Samarskogo. Moscow, Publ. Nauka, 192 p.
- Kochetova Zh.Yu., Bazarsky O.V., Panteleev D.A. 2023. Soil Ecology of Military Ranges. Voronezh, Publ. Nauchnaya kniga, 184 p.
- Lorenz E. 1981. Determinirovannoe neperiodicheskoe techenie [Deterministic Non-Periodic Flow]. In: Strannye attraktory [Strange Attractors]. Moscow, Publ. Mir: 88–117.
- Panteleev D.A., Bazarsky O.V., Kochetova J.Y. 2023. Methodology for Mapping Soil Contamination of Military Landfills with Significantly Altered Terrain. Regional Geosystems, 47(4): 607–618 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-607-618>
- Rosenberg G.S. 2011. Ecology and Cybernetics: Spooring Margalef. Biosphere, 3(4): 445–454 (in Russian).
- Sugak E.V. 2014. Modern Methods of Estimation of Environmental Risk. European Social Science Journal, 5–2(44): 427–433 (in Russian).
- Kharkina M.A. 2004. Ekologicheskiye posledstviya voyennykh deystviy [Environmental Consequences of Military Actions]. Energy: Economics, Technology, Ecology, 7: 56–59.

- Lorenz E.N. 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2): 130–141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2).
- Feigenbaum M. 1978. Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations. *Journal of Statistical Physics*, 19(1): 25–52. <https://doi.org/10.1007/BF01020332>.
- Mathematics Differential and Integral Equations, Dynamical Systems and Control Theory, Mathematical Physics. Series: Cambridge Texts in Applied Mathematics. 1994. Cambridge University Press, 240 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626296>.

*Поступила в редакцию 26.02.2024;  
поступила после рецензирования 15.04.2024;  
принята к публикации 23.04.2024*

*Received February 26, 2024;  
Revised April 15, 2024;  
Accepted April 23, 2024*

**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**, доктор географических наук, доцент кафедры эксплуатации и ремонта средств аэродромно-технического обеспечения полетов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

**Анциферова Галина Аркадьевна**, доктор географических наук, профессор кафедры природопользования, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

**Ларионов Алексей Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики, Воронежский государственный аграрный университет, 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. Bazariskij**, 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**, Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Operation and Repair of Airfield Technical Support of Flights 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

**Galina A. Antsiferova**, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Environmental Management of Voronezh State University, Voronezh, Russia

**Alexey N. Larionov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Mathematics and Physics of Voronezh State Agrarian University, Voronezh, Russia