



УДК 502(571.621)
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-4-574-584

Использование универсальной энтропийной модели для оценки экологического состояния территорий сельских поселений

³ Косинова И.И., ² Игнатенко И.М., ¹ Базарский О.В., ³ Курьшев А.А., ³ Бударина В.А.

¹ Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

³ Воронежский государственный университет,
Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1
E-mail: kaa@geol.vsu.ru

Аннотация. Сельские поселения современной России являются основой продовольственной политики страны, обеспечивают её демографическое и экономическое развитие. Осложняющим фактором является размещение сельских поселений в непосредственной близости от особо опасных промышленных и горнодобывающих объектов. Данное обстоятельство представляет собой вид воздействия, который сложно оценить в интегральном формате. В настоящее время разработаны частные методики оценки экологического состояния отдельных геосфер Земли, основанные на измерениях несовместимых показателей. Цель работы – разработка модели, пригодной для единого описания экологического состояния различных геосфер территорий сельских поселений, расположенных на участках различного уровня техногенного воздействия, которая основана на частной методике измерения экологического состояния приповерхностного слоя литосферы. В результате исследований построена модель динамического хаоса экологического состояния поверхностной части для территории сельских поселений Старооскольского района Белгородской области по уровню её загрязнения тяжёлыми металлами. Оценка уровня загрязнения по соответствующим шкалам показала, что средний уровень энтропии сельских поселений Старооскольского района Белгородской области находится в ранге нормы, по СПЗ – в ранге опасного. В заключении показано, что незначительная разница в оценках связана с незаконным с точки зрения математики сложением неаддитивных величин при вычислении СПЗ, что исключено в энтропийной модели динамического хаоса.

Ключевые слова: загрязняющие вещества, суммарный показатель загрязнения, моделирование, горнодобывающая промышленность, энтропия, устойчивость, эколого-геологические системы

Для цитирования: Косинова И.И., Игнатенко И.М., Базарский О.В., Курьшев А.А., Бударина В.А. 2022. Использование универсальной энтропийной модели для оценки экологического состояния территорий сельских поселений. Региональные геосистемы, 46(4): 574–584. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-574-584

Use of a Universal Entropy Model to Assess the Ecological State of the Rural Settlements Territories

³ Irina I. Kosinova, ² Ignat M. Ignatenko, ¹ Oleg V. Bazarsky,

³ Alexander A. Kuryshv, ³ Victoria A. Budarina

¹ Air Force Military Educational and Scientific Center
“Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”,
54a Old Bolsheviks St, Voronezh 394064, Russia

² Belgorod State National Research University,
85 Pobedy St, Belgorod 308015, Russia

³ Voronezh State University,
1 Universitetskaya Pl, Voronezh 394018, Russia
E-mail: kaa@geol.vsu.ru

Abstract. Rural settlements of modern Russia are the basis of the country's food policy. They provide its demographic and economic development. A complicating factor is the placement of especially dangerous



industrial and mining facilities rural settlements in the immediate vicinity. This type of impact is difficult to assess in an integral format. Currently, private methods have been developed for assessing the ecological state of the Earth individual geospheres. They are based on incompatible indicators measurements. These measures are not additive. They cannot be used to build a single model. The purpose of the work is to develop a model for a unified description of rural settlements the territories various geospheres the ecological state. Settlements are located in technogenic impact various levels areas. The model is based on a particular technique for measuring the ecological state of the lithosphere near-surface layer. A model of the dynamic chaos of the ecological state of the surface part was built for the territory of the Belgorod region the Starooskolsky district rural settlements in terms of its pollution with heavy metals. Assessment of the level of pollution according to the corresponding scales showed that the average level of entropy of rural settlements of the Starooskolsky district of the Belgorod region is in the rank of the norm, according to the SPZ – in the rank of dangerous. A slight difference in estimates is associated with the addition of non-additive values illegal from the point of view of mathematics in the calculation of SPZ. In the entropy model of dynamic chaos, this is excluded. This model shows that at low pollution levels the process is dynamic. When the current entropy increases due to bifurcations, an unstable chaotic state of the ecological system arises.

Key words: pollutants, total pollution index, modeling, ecological geology researches, entropy and sustainability of the ecological-geological system

For citation: Kosinova I.I., Ignatenko I.M., Bazarsky O.V., Kuryshev A.A., Budarina V.A. Use of a Universal Entropy Model to Assess the Ecological State of the Rural Settlements Territories Regional Geosystems, 46(4): 574–584 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-574-584

Введение

Современные научные исследования в области обеспечения экологической безопасности территорий приурочены, как правило, к особо опасным объектам, расположенным в пределах крупных населённых пунктов. Это обстоятельство связано с тем, что в советский период большинство промышленных предприятий размещалось непосредственно в городах. Подобная схема определялась удобной и низкокзатратной системой работы служебного транспорта, налаженным бытом, условиями транспортировки сырья и готовой продукции. В результате были сформированы промышленно-селитебные районы, в которых дома сотрудников крупных промышленных объектов размещались непосредственно за заборами самих предприятий [Василенко, Свергузова, 2019; Косинова и др., 2019; Сукало, 2022]. В середине прошлого века проблемы экологической безопасности не рассматривались. Сельские поселения в этом отношении выгодно отличались, их экологическая безопасность значительное время находилась на высоком уровне. Однако развитие экологических направлений в различных отраслях науки привело к пересмотру соответствующих разделов проектирования. Были актуализированы подходы, определяющие вынос особо опасных объектов на расстояния до 15 км от крупных населённых пунктов. Ярким примером обозначенного выше подхода стал Оскольский электрометаллургический комбинат. Следует отметить, что это единственное в России металлургическое производство полного цикла, в котором реализованы технологии прямого восстановления железа. Плавка в электропечах снимает целый спектр экологических проблем металлургических предприятий. Однако данное предприятие было размещено в 9 км от города Старый Оскол и первая плавка в электросталеплавильном цехе была проведена в 1984 году. В результате обозначенной парадигмы произошло перераспределение техногенной нагрузки в пространстве с захватом территорий сельских поселений. Так возникла проблема техногенного преобразования данных территорий, что актуализировало проблему их оценок и экологических прогнозов. В частности, нами



разработана методика интегральной геоэкологической оценки территорий длительно существующих объектов логистики нефтепродуктов [Fonova et al., 2021], которая определяет уровни комфортности среды обитания.

Тем не менее, в настоящее время не существует единой методики оценки экологического состояния техногенно преобразованных территорий. Разработаны частичные методики измерения экологического состояния отдельных геосфер: атмосферы, гидросферы и литосферы [Косинова, Ильяш, 2001; Негроров и др., 2005; Никиян, Давыдова, 2013; Стародубцев, 2014; Гарецкий, Каратаев, 2015; Михайлов, Добролюбов, 2017; Ильяш, 2019; Геология, геоэкология ..., 2020; СанПиН 1.2.3685-21, 2021]. Вследствие различных физических состояний этих геосфер введены и гостированы различные показатели измерения их экологического состояния: индекс загрязнения воздуха, суммарный показатель концентрации или загрязнения приповерхностной части литосферы (СПК и СПЗ), индекс загрязнения поверхностных вод. Все эти показатели основаны на вычислениях коэффициентов концентрации загрязняющих веществ (ЗВ), либо относительно фоновых значений, либо относительно предельно допустимой концентрации. Объединить эти частные методики в единую систему показателей невозможно, так как отсутствует единая модель описания экологического состояния различных геосфер. Отсюда вытекают две частные причины:

- 1) Абсолютно разные подходы при измерении экологического состояния различных геосфер.
- 2) Различные шкалы, применяемые при ранжировании измерений и не имеющие верхней границы.

Объекты и методы исследования

Разработка единой методики измерения экологического состояния различных геосфер Земли очень сложная задача, связанная с различием физико-химических процессов, протекающих в этих геосферах.

Целью данной работы является разработка модели, пригодной для единого описания экологического состояния различных геосфер территорий сельских поселений, расположенных на участках различного уровня техногенного воздействия, которая основана на частной методике измерения экологического состояния приповерхностного слоя литосферы. Выбор данного объекта исследования определяется по следующим причинам:

- приповерхностный слой литосферы является депонирующей средой, уровень загрязнения которой изменяется достаточно медленно. Этот уровень определяется суммарным воздействием как антропогенных факторов, так и самоочищением среды;
- имеется большая статистика как по пространственному загрязнению этой среды в различных регионах России, так и его динамике.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Создать модель, пригодную для единого описания экологического состояния различных геосфер.
2. Проанализировать эффективность и возможность применения для разработки единой методики существующих показателей СПК и СПЗ.
3. Разработать универсальную методику измерения экологического состояния приповерхностного слоя литосферы, пригодную для создания единой методики.

Универсальная модель для единого описания экологического состояния различных геосфер должна соответствовать следующим требованиям:

- быть аддитивной, чтобы можно было суммировать вклад её различных подсистем;



– быть цикличной и, соответственно, нелинейной, так как все сложные системы длительно функционируют циклично. При этом конечные экологические характеристики одного цикла должны быть входными для последующего;

– иметь ограниченную шкалу её состояний как снизу, так и сверху одинаковую для всех геосфер.

Указанным требованиям соответствует модель Ферхюльста ограниченного роста параметра [Шустер, 1988; Крянев, Лукин, 2006; Козырев, 2014; Стародубцев, Исаев, 2018], представляющая собой одномерное дискретное отображение, формируемое рекуррентным соотношением

$$P_{n+1} = q \cdot X_n \cdot (1 - X_n) \quad \forall n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где X_n величина исследуемого параметра n -той итерации, а X_{n+1} на $n+1$ -ой; n – номер итерации; N – количество итераций; q – внешний управляющий параметр.

Слагаемое qX_n в выражении (1) характеризует линейное приращение параметра на n -той итерации, а второе слагаемое $(-q \cdot X_n^2)$ – нелинейный сдерживающий фактор, накладывающий ограничения на бесконечный рост параметра.

Для универсальной модели, описывающей экологическое состояние различных геосфер, управляющий параметр должен быть аддитивным. Логично предположить, что это текущая энтропия S экологической системы, характеризующая степень беспорядка (хаоса), приобретаемого системой за счёт антропогенного воздействия [Экологическая геология ..., 2015].

При этом, если принять, что X принадлежит интервалу $[0, 1]$, то область существования S принадлежит интервалу $[0, 4]$. Переобозначим $X = P$. Тогда параметр P характеризует устойчивость системы [Ла-Салль, Лефшец, 1964; Ким, 2007]. При $P = 0$ – абсолютная устойчивость динамической системы, при $P = 1$ – абсолютная неустойчивость системы, переходящая в хаотическое состояние.

Таким образом, модифицированная для описания экологического состояния различных геосфер модель Ферхюльста принимает следующий вид

$$P_{n+1} = S \cdot P_n \cdot (1 - P_n). \quad (2)$$

Здесь P_1 – устойчивость экологической системы при начальных условиях её существования. Можно положить, что в этом случае система пребывает в одном состоянии, соответствующим природному фону, и её энтропия $S = 0$.

Увеличение энтропии за счёт антропогенного воздействия приводит к увеличению неустойчивости системы, зависящий от числа итераций n . Для депонирующей среды можно положить, что $n = 1$ соответствует одному году.

На рис. 1 приведена бифуркационная диаграмма модели для $n \in [30-100]$. Видно, что первая точка перегиба наблюдается при $S \in [0, 69-1]$. Здесь возникает уход от абсолютной устойчивости системы. Второй перегиб наблюдается при $S = 2$ (устойчивая точка), когда приращение неустойчивости замедляется. При $S = 3$ возникает следующая неустойчивость системы, связанная с первой бифуркацией, когда система самопроизвольно выбирает один из двух возможных путей развития. Далее бифуркации циклически повторяются, и система при $S \geq 3,5$ переходит к абсолютному хаосу.

Таким образом, при столетнем цикле развития эколого-геологической системы можно сформулировать следующую ограниченную снизу и сверху шкалу её экологического состояния, представленную в табл. 1.

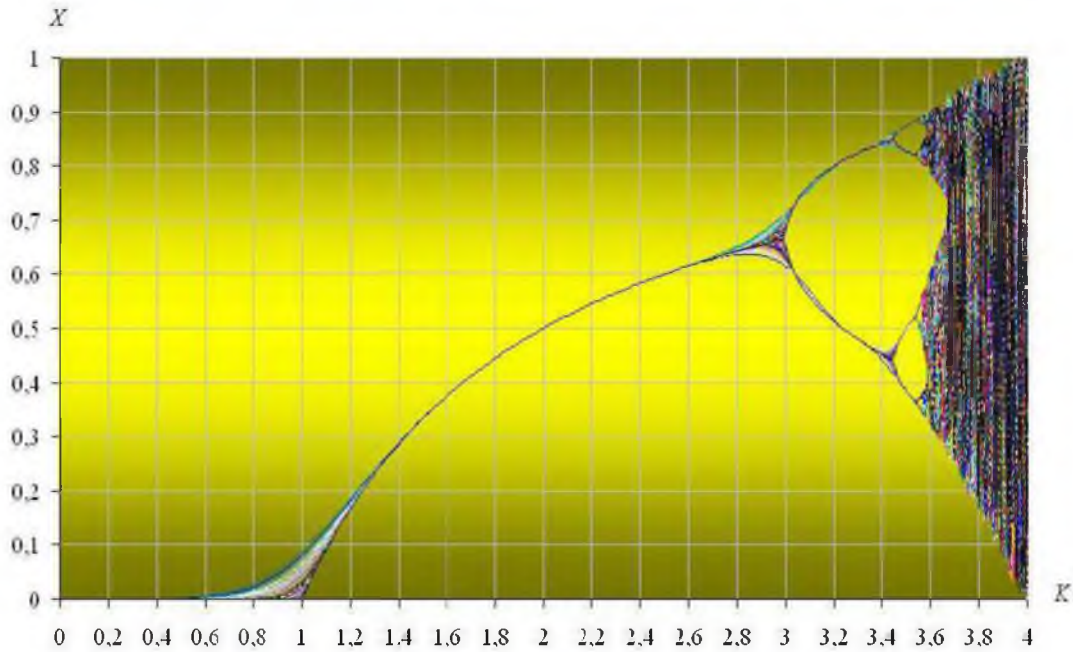


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма развития ЭГС $n \in [30-100]$
 Fig. 1. Bifurcation diagram of the EGS development $n \in [30-100]$

Таблица 1
 Table 1

Шкала ранжирования ЭГС по уровню её беспорядка (энтропии) и устойчивости
 EGS ranking scale by the level of its disorder (entropy) and stability

Параметры системы	Ранги	Характеристики рангов
$0 \leq S \leq 1;$ $0 \leq P \leq 0,05$	Экологическая норма	Антропогенное воздействие по каждому загрязняющему веществу не превышает ПДК
$1 < S \leq 2;$ $0,05 < P \leq 0,5$	Экологический риск	Уровень антропогенного воздействия превышает ПДК, но системы утилизации среднестатистического человека справляются с этой нагрузкой. Система находится в устойчивом равновесии
$2 < S \leq 3;$ $0,5 < P \leq 0,67$	Компенсированный экологический кризис	Переходный процесс из устойчивого равновесия в неустойчивое. За счёт проведения эколого-медицинских мероприятий ещё возможно удержать её в квазиустойчивом состоянии
$3 < S \leq 3,5;$ $0,67 < P \leq 0,85$	Некомпенсированный экологический кризис	За счёт первой бифуркации система переходит в состояние динамического хаоса, и возможны два непредсказуемых пути её развития
$3,5 < S \leq 4;$ $0,85 < P \leq 1$	Бедствие	Множественные бифуркации. Система находится в состоянии абсолютного хаоса. Старая популяция погибает. Однако при $S = 3,77$ существует окно, в котором возможно выживание приспособившиеся части старой популяции и зарождения новой.

Для вычисления показателя СПК необходимо знать региональный фон территории.

$$СПК = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\phi i}} - (n-1) = \sum_{i=1}^n K_{ki} - (n-1) \quad (3)$$

где C_i – концентрация i -того загрязняющего вещества; $C_{\text{фи}}$ – фоновое значения этой концентрации; n – число загрязняющих веществ; K_{ki} – фоновый коэффициент концентрации. Это региональный показатель, который не является универсальным.

Более общим является показатель СПЗ, где вычисление коэффициентов концентрации осуществляется путём деления измеренных концентраций на предельно допустимые концентрации (ПДК), являющиеся универсальными.

$$СПК = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i} - (n-1) = \sum_{i=1}^n K_i - (n-1) \quad (4)$$

Здесь $K_i > 1$ – коэффициенты концентрации, превышающие ПДК, берущиеся в расчёт.

Слагаемое $(n-1)$ приводит начальные значения шкал СПК и СПЗ к единице, если все измеренные значения загрязняющих веществ равны ПДК.

Для малого числа загрязняющих веществ шкала ранжирования СПЗ приведена в табл. 2 [Базарский, Косинова, 2005].

Для анализа эффективности этого показателя проанализируем его возможности на примере загрязнения тяжёлыми металлами приповерхностных отложений Обуховского, Долгополянского и Стригуновского сельских поселений. Были проведены измерения в 76 точках территории с определением концентрации следующих тяжёлых металлов: никеля, цинка, свинца, меди, марганца, железа, кадмия, мышьяка. Превышение ПДК наблюдалось только по никелю, цинку и не существенное по мышьяку – 1,05 ПДК.

Таблица 2
Table 2

Ранжирование суммарного показателя загрязнения экологической системы
Ranking of the ecological system pollution total indicator

Показатель	Ранги
$СПЗ < 1$	Допустимый
$1 \leq СПЗ < 2$	Умеренно опасный
$2 \leq СПЗ < 5$	Опасный
$5 \leq СПЗ < 10$	Высоко опасный
$СПЗ \geq 10$	Чрезвычайно опасный

По результатам измерений построены гистограммы – законы распределения загрязняющих веществ по никелю и цинку, рисунки 2 и 3. Источник загрязнения – Стойленский ГОК и Оскольский электрометаллургический комбинат (ОЭМК). Минимальный шаг дискретизации определяется точностью измерительных приборов. Однако в этом случае большая часть градаций имеет нулевую вероятность из-за ограниченности числа измерений. Поэтому шаг дискретизации градаций и их число выбиралось исходя из двух факторов. Точность статистической обработки результатов измерений должна быть менее 0,5 ПДК, при минимуме числа градаций с нулевой вероятностью. На гистограммах показаны две шкалы: шкала концентрации в мг/кг со средними арифметическими значениями каждой градации и шкала коэффициентов концентрации. Стрелки показывают порог отсечения неопасных градаций.

За истинное значение измеряемой по гистограмме величины принимается её математическое ожидание.

$$\langle K \rangle = \sum_{i=i_0}^N P_i \cdot K_i, \quad (5)$$

где i_0 – первая градация, имеющая $K_i > 1$, N – число градаций.



Отметим, что величина K_i определяет число состояний i -того ранга гистограммы, а P_i – вероятность этого состояния. Но K_i – это ущерб, выносимый этой градацией в загрязнение окружающей среды, а $P_i \cdot K_i$ – это экологический риск, создаваемый i -той градацией.

Математическое ожидание $\langle K \rangle$ – это среднестатистическая величина экологического риска, создаваемого опасными градациями одного загрязняющего вещества (ЗВ).

Результаты и их обсуждение

По никелю $\langle K \rangle_{Ni} = 0,63$ (рис. 2). Шаг дискретизации $\Delta C = 6$ мг/кг при шести градациях. Точность обработки 0,3 ПДК.

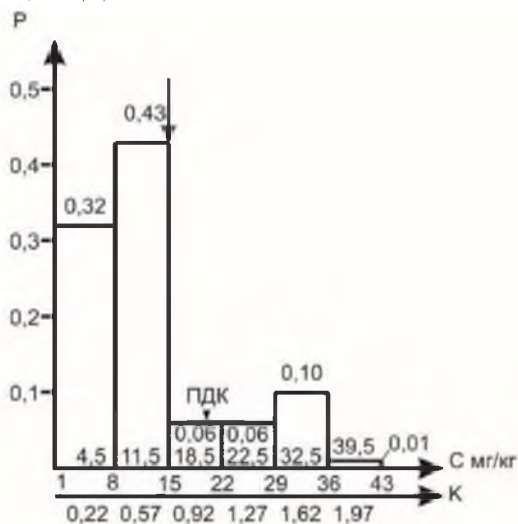


Рис. 2. Закон распределения (гистограмма) загрязнения приповерхностных отложений Обуховского, Долгополянского и Стригуновского сельских поселений по никелю
 Fig. 2. Law of distribution (histogram) of pollution of near-surface deposits of Obukhovskoye, Dolgopolyansky and Strigunovskoye rural settlements by nickel

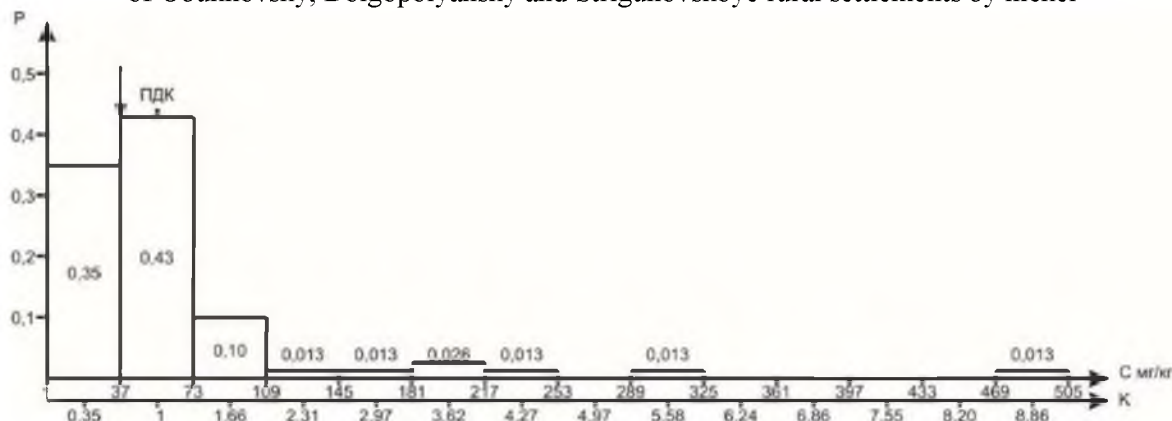


Рис. 3. Закон распределения (гистограмма) загрязнения приповерхностных отложений Обуховского, Долгополянского и Стригуновского сельских поселений по цинку
 Fig. 3. Law of distribution (histogram) of pollution of near-surface deposits of Obukhovskoye, Dolgopolyansky and Strigunovskoye rural settlements by zinc

Проанализируем теперь гистограмму загрязнения по цинку (рис. 3). Здесь наблюдается очень большая вариабельность пространственного распределения этого загрязняющего вещества. В соответствии с этим, шаг дискретизации выбран равным 36 мг/кг при точности обработки 0,25 ПДК. Число градаций 14. Но при этом ряд градаций имеют нулевые вероятности из-за недостатка числа изменений при существующей вариабельности загрязнения по цинку. Величина экологического риска по цинку $\langle K \rangle_{Zn} = 1,86$.

Тогда СПЗ = 0,63 + 1,86 – 1 = 1,49. Следовательно, загрязнение территорий сельских поселений тяжёлыми металлами находится в ранге умеренно опасного.

Принятая методика вычисления СПЗ, по сути, является «общественным договором», так как ранги определены на основе экспертных оценок. Она не может быть универсальной для различных геосфер, потому что в методике происходит суммирование приведённых экологических рисков, которые не являются аддитивной величиной, что некорректно. В авторской статье [Базарский, Косинова, 2005] предложена методика геометрического суммирования индекс-векторов экологических рисков, пригодная для депонирующей ЭГС, но её универсальность не доказана. Методика измерения экологического состояния ЭГС складывается из следующих шагов:

1. Производятся эколого-геологические изыскания по определению концентраций стандартного перечня ЗВ. Выявляются опасные ЗВ, средние значения концентраций которых превышают ПДК. Это стандартная процедура.

2. Строятся гистограммы загрязнения урбанизированной территории выявленными опасными ЗВ.

3. На гистограммах отбрасываются неопасные градации, у которых коэффициенты концентрации не превышают единицы.

4. Аддитивной величиной, определяющей экологическое состояние любой геосферы, является её энтропия, то есть каждый опасный ранг гистограммы должен определяться не экологическим риском, а приращением энтропии

$$S_i = P_i \ln K_i, \quad (6)$$

где K_i – логарифм числа состояний i -го ранга, P_i – вероятность его реализации.

5. Полное приращение энтропии, создаваемое одним загрязняющим веществом, определяется выражением:

$$S_i = \sum_{i=i_0}^N P_i \ln K_i, \quad (7)$$

где N – число опасных рангов гистограммы.

По законам статистической физики [Компьютеры и нелинейные ..., 1988; Матвеев, 2006] общее число состояний системы, состоящей из N подсистем, определяется не суммой, а произведением числа состояний. Аддитивно можно складывать только логарифмы числа состояний, выражение (7).

6. На заключительном этапе методики, реализующей предложенную универсальную модель (2), необходимо вычислять полное приращение энтропии, создаваемое всеми опасными ЗВ

$$7. \Delta S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n S_j.$$

Для сравнения со стандартным показателем СПЗ рассчитаем величину полной энтропии для современного экологического состояния Обуховского, Долгополянского и Стригуновского сельских поселений.

$$S_{Ni} = \sum_{i=3}^6 P_i \ln K_i = -0,005 + 0,014 + 0,048 + 0,067 = 0,124$$

$$S_{Zn} = \sum_{i=2}^{14} P_i \ln K_i = 0 + 0,05 + 0,01 + 0,01 + 0,33 + 0,018 + 0,01 + 0,028 = 0,456.$$

Суммарная энтропия $S_{\Sigma} = 0,063 + 0,455 = 0,58$. Обращаясь к рис. 1, с учётом того, что антропогенное загрязнение исследуемых территорий продолжается порядка 100 лет, получаем, что в настоящее время экосистема сельских поселений по тяжёлым металлам является абсолютной устойчивой и находится в ранге экологической нормы.



Вычисленный СПЗ дал следующий результат: загрязнение по тяжёлым металлам – умеренно опасное. Последний результат связан с точечным высоким загрязнением по цинку вблизи Стойленского ГОКа, где производятся буровзрывные работы. Но в целом, загрязнение всей территории исследуемых сельских поселений находится в ранге экологической нормы, что и даёт более точная аддитивная энтропийная модель.

Заключение

Математическое ожидание уровня загрязнения по одному веществу определяет экологический риск, приводящий к деградации окружающей среды. Суммирование этих показателей некорректно и даёт завышенную оценку уровня деградации среды, даже по ограниченному числу загрязняющих веществ.

Универсальной аддитивной моделью, описывающей деградацию окружающей среды, является модель Ферхюльста, модифицированная для экологического описания сред различной физической природы. В ней управляющим параметром является текущая энтропия системы $0 \leq S \leq 4$, а результатом ряда циклических итераций является уровень её устойчивости $0 \leq P \leq 1$.

Полная энтропия эколого-геологических систем по ряду n загрязняющих веществ определяется выражением:

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^{N_i} P_i \ln K_i \right),$$

где K_i – число состояний одного загрязняющего вещества, P_i – вероятность их реализации, N_i – число опасных градаций.

Выявлено, что загрязнение территорий Обуховского, Долгополянского и Стригуновского сельских поселений Старооскольского района Белгородской области находится в ранге экологической нормы.

Разработанная энтропийная модель ЭГС является аддитивной, может стать базовой для оценки деградации компонентов окружающей среды техногенно нагруженных территорий сельских поселений.

Список источников

- Василенко Т.А., Свергузова С.В. 2019. Оценка воздействия на окружающую среду и экологическая экспертиза инженерных проектов. М., Вологда, Инфра-Инженерия, 265 с.
- Ильяш В.В. 2019. Физика земли. Старый Оскол, 68 с.
- Ким Д.П. 2007. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М., Физматлит, 440 с.
- Матвеев А.Н. 2006. Молекулярная физика. Москва, Оникс: Мир и Образование, 358 с.
- Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. 2017. Гидрология. М., Берлин, Директ-Медиа, 753 с.
- Никиян А., Давыдова О. 2013. Биофизика. Оренбург, Оренбургский государственный университет, 104 с.
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Москва, Минюст России, 1025 с.
- Стародубцев В.С. 2014. Эколого-гидрогеологическое прогнозирование и моделирование. Воронеж, Воронежский государственный университет, 116 с.
- Сукало Г.М. 2022. Надзор и контроль в сфере безопасности. М., Директ-Медиа, 308 с.

Список литературы

- Базарский О.В., Косинова И.И. 2005. О единой метрике комплексного эколого-геологического пространства. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 2: 168–172.
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. 2015. Эколого-тектонифизическая среда Беларуси. Минск, Белорусская наука, 184 с.



- Геология, геоэкология, эволюционная география. 2020. Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. СПб., Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена (РГПУ), 296 с.
- Козырев С.Б. 2014. Методическая программная поддержка динамической системы Ферхюльста. Вестник Костромского государственного университета имени Н.А. Некрасова, 20(5): 8–14.
- Компьютеры и нелинейные явления. Информатика и современное естествознание. 1988. М., Наука, 190 с.
- Косинова И.И., Бударина В.А., Фонова О.Г., Долбилова С.В., Зинченко Е.В. 2019. Преобразование абиотических компонентов природной среды в районах длительно существующих объектов логистики нефтепродуктов. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 1: 88–92.
- Косинова И.И., Ильяш В.В. 2001. Особенности и функциональное назначение эколого-геологических исследований территорий. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 11: 230–236.
- Крянев А.В., Лукин Г.В. 2006. Математические методы обработки неопределенных данных. М., Физматлит, 281 с.
- Ла-Салль Ж., Лефшец С. 1964. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова. М., Мир, 168 с.
- Негробов О.П., Астанин И.К., Стародубцев В.С., Астанина Н.Н. 2005. Оценка локального загрязнения приземного слоя атмосферы с учетом регионального переноса. В кн.: Проблемы охраны окружающей среды современного города. Материалы I Межрегиональной научно-практической конференции, 30 мая 2005. Воронеж, Кривичи: 31–36.
- Стародубцев В.С., Исаев О.В. 2018. Модели и алгоритмы оценки устойчивости функционирования информационной системы в условиях воздействия негативных факторов. Вестник Воронежского института ФСИИ России, 1: 104–107.
- Шустер Г. 1988. Детерминированный хаос. Введение. М., Мир, 240 с.
- Экологическая геология крупных горнодобывающих районов Северной Евразии (теория и практика). 2015. Под ред. И.И. Косиновой. Воронеж, Воронежская областная типография – издательство им. Е.А. Болховитинова, 576 с.
- Kosinova I.I., Fonova O.G., Fonova S.I. 2021. Assessment Criteria for Ecological and Geological Zoning of Territories. South of Russia: ecology, development, 16(4(61)): 104–112. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-104-112

References

- Bazarsky O.V., Kosinova I.I. 2005. About Indivisible Birth Certificate of Complex Ecological-Geological Area. Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology, 2: 168–172. (in Russian).
- Garetskiy R.G., Karataev G.I. 2015. Ekologo-tektonofizicheskaya sreda Belarusi [Ecological and Tectonophysical Environment of Belarus]. Minsk, Publ. Belorusskaya nauka, 184 p.
- Geologiya, geoekologiya, evolyutsionnaya geografiya [Geology, Geoecology, Evolutionary Geography]. 2020. Ed. by E.M. Nesterov, V.A. Snytko. Saint Petersburg, Publ. Rossiyskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet im. A.I. Gertsena (RGPU), 296 p.
- Kozyrev S.B. 2014. Methodological Software Support of Verhulst Dynamic System. Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N.A. Nekrasova, 20(5): 8–14. (in Russian).
- Kompyutery i nelineynyye yavleniya. Informatika i sovremennoye estestvoznaniye [Computers and nonlinear phenomena. Informatics and Modern Natural Science]. 1988. Moscow, Publ. Nauka, 190 p.
- Kosinova I.I., Budarina V.A., Fonova O.G., Dolbilova S.V., Zinchenko E.V. 2019. Transformation of Abiotic Components of the Environment in Areas of Long-Existing Oil Products Logistics Facilities. Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology, 1: 88–92 (in Russian).
- Kosinova I.I., Ilyash V.V. 2001. Osobennosti i funktsionalnoye naznacheneye ekologo-geologicheskikh issledovaniy territoriy [Features and Functional Purpose of Ecological and Geological Studies of Territories]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya, 11: 230–236.
- Kryanev A.V., Lukin G.V. 2006. Matematicheskie metody obrabotki neopredelennykh dannykh [Mathematical methods for processing uncertain data]. Moscow, Publ. Fizmatlit, 281 p.
- La-Salle J., Lefschetz S. 1964. Stability by Liapunov's direct method. Moscow, Publ. Mir, 168 p. (in Russian).
- Negrobov O.P., Astanin I.K., Starodubtsev V.S., Astanina N.N. 2005. Otsenka lokalnogo zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery s uchetom regionalnogo perenosa [Assessment of local pollution of the



- surface layer of the atmosphere, taking into account regional transport]. In: Problemy okhrany okruzhayushchey sredy sovremennogo goroda [Problems of environmental protection of the modern city]. Materials of the I Interregional Scientific and Practical Conference, 30 May 2005. Voronezh, Publ. Krivichi: 31–36.
- Starodubtsev V.S., Isaev O.V. 2018. Models and Algorithms of Assessment of Stability of Functioning of the Information System in the Conditions of Influence of Negative Factors. Proceedings of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, 1: 104–107 (in Russian).
- Shuster G. 1988. Deterministic chaos: An Introduction. Moscow, Publ. Mir, 240 p. (in Russian).
- Ekologicheskaya geologiya krupnyh gomodobyvayushchih rajonov Severnoj Evrazii (teoriya i praktika) [Ecological Geology of Large Mining Areas of Northern Eurasia (Theory and Practice)]. 2015. Ed. by Kosinova I.I. Voronezh, Voronezhskaya oblastnaya tipografiya – izdatelstvo im. E.A. Bolkhovitina, 576 p.
- Kosinova I.I., Fonova O.G., Fonova S.I. 2021. Assessment Criteria for Ecological and Geological Zoning of Territories. South of Russia: ecology, development, 16(4(61)): 104–112. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-104-112

*Поступила в редакцию 08.10.2022;
поступила после рецензирования 02.11.2022;
принята к публикации 15.11.2022*

*Received October 08, 2022;
Revised November 02, 2022;
Accepted November 15, 2022*

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Косинова Ирина Ивановна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой экологической геологии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

Irina I. Kosinova, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Ecological Geology of the Voronezh State University, Voronezh, Russia

Игнатенко Игнат Михайлович, кандидат технических наук, доцент, директор института наук о Земле Белгородского государственного национального исследовательского университета, Белгород, Россия

Ignat M. Ignatenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Earth Sciences of the Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Базарский Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Военного учебно-научного центра военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Oleg V. Bazarsky, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Air Force Military Educational and Scientific Center of the “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Voronezh, Russia

Курышев Александр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экологической геологии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

Alexander A. Kuryshev, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Ecological Geology of the Voronezh State University, Voronezh, Russia

Бударина Виктория Александровна, кандидат юридических наук, доцент кафедры экологической геологии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

Victoria A. Budarina, Candidate of Legal Sciences, Associate Professor of the Department of Ecological Geology of the Voronezh State University, Voronezh, Russia