

АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ ИНДЕКСОВ (ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК) КАЧЕСТВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ АНТРОПОГЕННО ИЗМЕНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Матвиец Д.А.¹

¹*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), e-mail: damatviiec@mail.ru*

В работе рассматриваются методы построения частных и интегральных оценок качества окружающей среды и предлагается их систематизация на основе принципов квалиметрии, теории измерений и теории средних величин. Выделены основные технологические этапы построения интегральной оценки качества/некачественности окружающей среды типа «экологическая опасность антропогенно измененных территорий»: расчет частных абсолютных оценок качества на основе учета интервалов изменения исходных частных показателей; расчет частных относительных оценок качества/некачественности, учитывающих предельно допустимые значения по каждому показателю качества; расчет интегральной оценки качества/некачественности, учитывающей неравноценность частных относительных оценок. Для содержательной интерпретации интегральной оценки качества/некачественности окружающей среды для антропогенно измененных территорий используется «зеркальная» вербально-числовая шкала Харрингтона. Предлагаемая интегральная оценка является адаптивной оценкой, позволяющей при необходимости расширять перечень показателей качества и корректировать их интервалы изменения и экологические нормативы.

Ключевые слова: индекс качества окружающей среды, частные абсолютные оценки качества, относительные и интегральные оценки экологической опасности антропогенно измененных территорий.

THE ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO CREATION OF INDEXES (INTEGRATED ESTIMATES) OF QUALITY OF ENVIRONMENT FOR THE ANTHROPOGENOUS CHANGED TERRITORIES

Matviets D.A.¹

¹*Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh) Russia (394064, Voronezh, street Staryh Bolshevikov, 54 a), e-mail: damatviiec@mail.ru*

In work methods of creation of private and integrated estimates of quality of environment are considered and their systematization on the basis of the principles of a kvalimetriya, the theory of measurements and the theory of average sizes is offered. The main technological stages of creation of an integrated assessment of quality/low quality of environment like "ecological danger of the anthropogenous changed territories" are allocated: calculation of private absolute estimates of quality on the basis of the accounting of intervals of change of initial private indicators; calculation of the private relative estimates of quality/low quality considering maximum-permissible values on each indicator of quality; calculation of an integrated assessment of the quality/low quality considering non-equivalence of private relative estimates. For substantial interpretation of an integrated assessment of quality/low quality of environment for the anthropogenous changed territories the «mirror» verbal and numerical scale of Harrington is used. The offered integrated assessment is the adaptive assessment allowing to expand if necessary the list of indicators of quality and to correct their intervals of change and ecological standards.

Keywords: index of quality of environment, private absolute estimates of quality, relative and and integrated estimates of ecological danger of the anthropogenous changed territories.

Основная цель работы заключается в систематизации индексов качества окружающей среды (ОС) на основе анализа методов построения частных и интегральных оценок экологического состояния антропогенно измененных территорий.

В настоящее время в эколого-географических исследованиях широко используются

индексы загрязнения природных компонентов ОС типа «суммарная величина», которые в общем виде вычисляются по формуле:

$$\sum_{j=1}^m f(z_j) = f(z_1) + f(z_2) + \dots + f(z_m). \quad (1)$$

Здесь z_j – частная квалиметрическая оценка экологического состояния анализируемых геообъектов для j -го исходного ПК, $j=1,2,\dots, m$. Например, $z_j = y_j / y_j^{\text{пд}}$, где y_j – натуральное значение, а $y_j^{\text{пд}}$ – предельно допустимое значение (экологический норматив) для j -го ПК. При $f(z_j) = z_j = c_j/\text{ПДК}_j$, т.е. когда значение y_j совпадает со значением c_j – средней концентрацией j -го загрязняющего вещества, а величина $y_j^{\text{пд}}$ – с предельно допустимой концентрацией (ПДК) по j -му ингредиенту, получаем известные индексы загрязнения атмосферы (ИЗА), загрязнения воды (ИЗВ) и суммарного показателя загрязнения почвы (СПЗ). В этом случае ИЗВ типа «суммарная концентрация» имеет вид:

$$\text{ИЗВ} = \sum_{j=1}^m \frac{c_j}{\text{ПДК}_j} = \frac{c_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{c_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{c_m}{\text{ПДК}_m}. \quad (2)$$

Здесь: m – число приоритетных загрязняющих веществ; c_j – среднее значение концентрации j -го загрязняющего вещества в воде за год (или период), мг/дм³; ПДК_j – санитарно-гигиенический норматив (предельно допустимая концентрация) j -го загрязняющего вещества в воде, мг/дм³. Аналогичным образом рассчитываются индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) и суммарный показатель загрязнения почвы (СПЗ).

Общим методическим подходом к построению суммарных индексов качества ОС является преобразование исходных единичных (частных) ПК к безразмерному виду (построение частных относительных оценок концентрации загрязняющих веществ на основе сопоставления значений исходных частных ПК с соответствующими ПДК) и их последующее суммирование (построение интегральных оценок степени загрязнения природных компонентов).

При оценке степени гидрохимического загрязнения воды для обоснования комплекса водоохраных мероприятий используются санитарно-гигиенические нормативы (ПДК) и ориентировочно допустимые уровни химических веществ в зависимости от класса опасности ингредиентов загрязнения [9]. В случае присутствия в воде нескольких химических ингредиентов 1 и 2 класса опасности и нормируемых по санитарно-токсикологическому действию, сумма отношений концентраций каждого из них к соответствующей величине ПДК не должна быть больше 1, т.е. должно выполняться неравенство:

$$\sum_{j=1}^m \frac{c_j}{\text{ПДК}_j} = \frac{c_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{c_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{c_m}{\text{ПДК}_m} \leq 1, \quad (3)$$

где c_j – концентрация j -го ингредиента загрязнения для одного и того же лимитирующего показателя вредности (ЛПВ); ПДК_j – санитарно-гигиенический норматив для j -го загрязняющего вещества.

Неравенство (3) на практике может не выполняться.

Для интегральной оценки качества ОС в геосистемном анализе экологического состояния антропогенно измененных территорий используются индексы типа «средневзвешенных величин»: средневзвешенное арифметическое (4) и средневзвешенное геометрическое (5):

$$\sum_{j=1}^m v_j f(z_j) = v_1 f(z_1) + v_2 f(z_2) + \dots + v_m f(z_m), \quad (4)$$

$$\prod_{j=1}^m h_j^{v_j} = h_1^{v_1} h_2^{v_2} \dots h_m^{v_m}. \quad (5)$$

Здесь v_j – весовой коэффициент (вес) частной оценки z_j , отражающий ее относительную значимость (приоритетность) и удовлетворяющий условию:

$$\sum_{j=1}^m v_j = 1, v_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

Как правило, веса v_j определяются на основе нормативно-справочной информации (например, сведений о классе опасности загрязняющего вещества) и методов экспертной оценки приоритетности ингредиентов загрязнения (например, метода анализа иерархий и метода парных сравнений [8]).

Для ИЗВ типа «среднее арифметическое» при $c_j \leq \text{ПДК}_j$ и $v_j = 1/m$ имеет место соотношение:

$$\text{ИЗВ}_{\text{ср.арифм.}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{c_j}{\text{ПДК}_j} \leq 1. \quad (7)$$

В дальнейшем будем считать, что чем меньше значение u_j исходного ПК, тем выше качество ОС (например, уровень химического загрязнения c_j антропогенно измененных территорий). В соответствии с основными принципами квалиметрии [1], теории измерений [7; 9] сделаем следующие заключения:

1) безразмерная величина $z_j = c_j / \text{ПДК}_j$ является частной относительной оценкой качества окружающей среды по j -му ПК. В квалиметрии данная оценка принимает значения из интервала $[0,1]$. При $c_j = \text{ПДК}_j$ величина $z_j = 1$ (т.е. чем больше значение ингредиента

загрязнения c_j , тем выше качество ОС), что противоречит содержательному смыслу. В этом случае целесообразно использовать частную нелинейную абсолютную оценку качества ОС следующего вида: $z_j = \text{ПДК}_j / c_j$. При $c_j \leq \text{ПДК}_j$ данная оценка является измерением в числовой шкале $[0,1]$. Ее нулевое значение соответствует «отсутствию» качества, а единичное значение – «идеальному» качеству ОС; 2) в теории измерений частная оценка $z_j = c_j / \text{ПДК}_j$ является допустимым преобразованием в шкале отношений, т.е. это функция подобия вида $z_j = a c_j$ при $a = 1 / \text{ПДК}_j$. В этой шкале «корректной» интегральной оценкой (индексом) качества ОС является среднее геометрическое.

При построении индексов качества ОС в работе [4] используется следующее преобразование исходных ПК к безразмерному виду (частным абсолютным оценкам качества):

$$z_j = [(y_j^{\text{вр}} - y_j) / (y_j^{\text{вр}} - y_j^{\text{нр}})]^k. \quad (8)$$

Здесь z_j – частная абсолютная оценка качества для j -го ПК, принимающая значения из интервала $[0,1]$; $y_j^{\text{нр}}$, $y_j^{\text{вр}}$ – нижняя и верхняя границы интервала изменения j -го ПК; $j=1,2,\dots,m$. При $k=1$ имеем линейное преобразование [3], при $k \neq 1$ – нелинейное.

Для построения индексов качества природных компонентов в виде обобщенных функций желательности Харрингтона [1] используются интегральные оценки типа «средняя геометрическая величина»:

$$\prod_{j=1}^m h_j^{1/m} = h_1^{1/m} h_2^{1/m} \dots h_m^{1/m}. \quad (9)$$

Здесь h_j – частная функция желательности (линейное или нелинейное преобразование в числовую шкалу $[0,1]$) для j -го исходного ПК.

В работе [3] для построения частных функций желательности h_j предлагается использовать следующую формулу:

$$h_j = \frac{y_j^{\text{вр}} - y_j}{y_j^{\text{вр}} - y_j^{\text{нр}}}, \quad (10)$$

где $y_j^{\text{нр}} = 0.95 y_j^{\text{мин}}$ и $y_j^{\text{вр}} = 1.05 y_j^{\text{макс}}$ – соответственно нижняя и верхняя границы интервала изменения j -го ПК.

Наиболее простыми преобразованиями натуральных значений ПК в интервал $[0,1]$ являются частные функции желательности следующего вида [2]:

$$h_j = \frac{y_j}{y_j^{\text{вр}}}, \quad (11)$$

$$h_j = \frac{y_j}{y_j^{\text{пд}}}. \quad (12)$$

Здесь $y_j^{\text{пд}}$ – предельно допустимое значение j -го ПК, например, $y_j^{\text{пд}} = \text{ПДК}_j$.

Отметим, что формула (12) – частный случай формулы (11), когда величина $y_j^{\text{бр}}$ рассматривается как предельно допустимое значение j -го ПК. Функция желательности (12) принимает значения от нуля до единицы при выполнении неравенства $y_j \leq y_j^{\text{пд}}$. При этом формула (11) – частный случай линейного преобразования (8), когда минимальные значения не равны нулю.

В эколого-географических исследованиях для оценки качества ОС используются функции желательности Харрингтона [1]. При этом частная нелинейная функция «желательности» экологического состояния антропогенно измененных территорий имеет следующий вид:

$$h_j = \exp(-\exp(-z_j)), \quad (13)$$

где z_j – частная оценка качества ОС, которой соответствуют преобразованные значения исходных ПК; \exp – экспоненциальная функция.

Обобщенная функция желательности является среднегеометрической величиной, которая вычисляется по формулам (11) или (12). Значения аргумента z_j частной функции желательности h_j вычисляются по определенной методике [1]. Частные и обобщенная функции Харрингтона имеют несколько критических точек, что позволяет задавать границы градаций желательности не произвольным, а строгим образом. Точки перегиба имеют ординаты 0,8; 0,63; 0,37; 0,2. Если следовать принципу «чем меньше значение частной функции желательности, тем выше качество ОС», то эти точки задают определенные диапазоны в интервале [0,1] вербально-числовой шкалы желательности: «очень хорошо» (0,00–0,20), «хорошо» (0,20–0,37), «удовлетворительно» (0,37 – 0,63), «плохо» (0,63–0,80), «очень плохо» (0,80–1,00). Задание соответствия между преобразованными и исходными значениями ПК осуществляется экспертом на основе определения коэффициентов уравнения прямой $z_j = b y_j + a$. Коэффициенты a и b можно вычислить, если задать для двух значений исходных ПК соответствующие значения частной функции желательности. Например, точке 0,63 ставится в соответствие предельно допустимое значение ($y_j^{\text{пд}} = \text{ПДК}_j$), а точке 0,20 – минимальное значение $y_j^{\text{мин}}$ j -го исходного ПК. Тогда имеют место следующие соотношения $\exp(-\exp(-z_j^{\text{пд}})) = 0,63$, $\exp(-\exp(-z_j^{\text{мин}})) = 0,20$, позволяющие определить значения частных функций желательности. Таким образом, при построении этих функций требования к качеству ОС учитываются в неявном виде.

Подчеркнем, что при построении интегральных оценок качества природных компонентов необходимо рассматривать проблемные экологические ситуации, для которых часть требований к качеству ОС выполняется, а часть – не выполняется. Отсюда следует, что используемые индексы должны учитывать эти ограничения. Например, в ситуации, когда концентрации всех загрязняющих веществ c_j в воде равны или превышают ПДК_j, используется индекс следующего вида:

$$\sum_{j=1}^m \frac{c_j}{\text{ПДК}_j} - (m-1) = \text{ИЗВ} - (m-1). \quad (14)$$

При этом значение индекса в формуле (14) равно 1 при всех $c_j = \text{ПДК}_j$ и больше 1 при $c_j > \text{ПДК}_j$, что существенно затрудняет содержательную интерпретацию шкалы данной интегральной оценки качества ОС. Отметим, что при выполнении санитарно-гигиенических нормативов будет выполняться следующее соотношение: $\text{ИЗВ} - (m-1) \leq 1$ или $\text{ИЗВ} \leq m$. Тогда значения «среднего арифметического» индекса $\text{ИЗВ}_{\text{ср.арифм.}}$, который вычисляется по формуле (4), не будут превышать единицы.

Структурная схема основных этапов построения рассмотренных выше индексов качества ОС представлена на рис. 1. Число возможных вариантов интегральной оценки качества ОС в структурной схеме на данном рисунке равно $N = 3^5 = 243$. Здесь показан вариант построения индекса загрязнения природных компонентов ОС по формуле (2).

Таким образом, индексы качества ОС являются интегральными линейными (аддитивными) или нелинейными (неаддитивными) оценками экологического состояния антропогенно измененных территорий типа средних величин. Данные оценки имеют ряд недостатков. В частности, они не удовлетворяют существенному свойству «ограниченной компенсации», т.е. условию невозможности компенсации «плохих» значений частных оценок качества за счет «хорошего» качества ОС по другим частным оценкам.

Кроме того, эти индексы не имеют вероятностной интерпретации, что необходимо для построения частных и интегральной оценок экологической опасности территорий. В «Инструкции по экологическому обоснованию хозяйственной и иной деятельности» (утв. Приказом Минприроды России от 29.12.1995 г., №539) экологическая опасность определяется как «вероятность ухудшения показателей качества природной среды (состояний, процессов) под влиянием природных и техногенных факторов, представляющих угрозу экосистемам и человеку».

Учет
нормативных
требований к

$$y_j^{\text{пд}} < \text{ПДК}_j$$

$$y_j^{\text{пд}} \geq \text{ПДК}_j$$

Не учитываются
требования к
качеству ОС

качеству ОС			
Учет нижней и верхней границ интервала изменения ПК	$[y_j^{\min}, y_j^{\max}]$	$[y_j^{\text{нр}}, y_j^{\text{вр}}], y_j^{\text{нр}} \leq y_j^{\min}, y_j^{\text{вр}} \geq y_j^{\max}$	Не учитываются границы интервала изменения ПК
Преобразование исходных ПК в частные оценки качества ОС	Линейное	Нелинейное	Частные функции желательности Харрингтона
Учет приоритетности частных оценок качества	$v_j=1/m, j=1,2,\dots,m$	$\sum_{j=1}^m v_j = 1, v_j \geq 0, j=1,2,\dots,m$	Не учитываются весовые коэффициенты
Вид интегральной оценки качества ОС	Суммарные индексы	Средневзвешенное арифметическое	Средневзвешенное геометрическое

Рис. 1. Систематизация возможных вариантов частных и интегральных оценок качества ОС.

Сформулируем следующий набор содержательных требований к интегральной оценке экологической опасности антропогенно измененных территорий:

- 1) конструируемая оценка должна быть нелинейным (неаддитивным) критерием, позволяющим измерять уровень загрязнения и деградации ОС;
- 2) данная оценка должна представлять собой некоторую «сводную» формулу, в которой «объединены» частные относительные оценки экологической опасности по отдельным ПК;
- 3) методики построения частных оценок должны входить составной частью в методику построения интегральной оценки;
- 4) частные оценки и интегральная оценка должны допускать вероятностную интерпретацию.

Кратко рассмотрим квалиметрические модели частных и интегральной оценок качества/некачественности антропогенно измененных территорий (природно-антропогенных геообъектов) [5-6].

Введем следующие обозначения: y_j^i – значение j -го ПК i -го геообъекта; $y_j^{\text{пд}}$ – предельно допустимое значение j -го ПК (экологический норматив) для всех анализируемых геообъектов; $q_j^i = q_j(y_j^i)$ – частная абсолютная оценка качества ОС для i -го геообъекта по j -му ПК; $q_j^{\text{пд}} = q_j(y_j^{\text{пд}})$ – соответствующий нормативный уровень экологического состояния территорий. В соответствии с принципами квалиметрии [1] будем считать, что $0 \leq q_j^i, q_j^{\text{пд}} \leq 1$,

($j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, N$). Их возможные варианты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Виды частных абсолютных и относительных оценок качества/некачественности
окружающей среды

№ п/п	Абсолютная оценка	Нормативный уровень	Относительная оценка
1	$q_j^i = \frac{y_j^{HR}}{y_j^i}$	$q_j^{nd} = \frac{y_j^{HR}}{y_j^{nd}}$	$d_j^i = \frac{q_j^{nd}(1-q_j^i)}{q_j^i(1-q_j^{nd})} = \frac{y_j^i - y_j^{HR}}{y_j^{nd} - y_j^{HR}}$
2	$q_j^i = \frac{y_j^{BR} - y_j^i}{y_j^{BR} - y_j^{HR}}$	$q_j^{nd} = \frac{y_j^{BR} - y_j^{nd}}{y_j^{BR} - y_j^{HR}}$	$d_j^i = \frac{q_j^{nd}(1-q_j^i)}{q_j^i(1-q_j^{nd})} = \frac{(y_j^{BR} - y_j^{nd})(y_j^i - y_j^{HR})}{(y_j^{BR} - y_j^i)(y_j^{nd} - y_j^{HR})}$
3	$q_j^i = \left[\frac{y_j^{BR} - y_j^i}{y_j^{BR} - y_j^{HR}} \right]^k$	$q_j^{nd} = \left[\frac{y_j^{BR} - y_j^{nd}}{y_j^{BR} - y_j^{HR}} \right]^k$	$d_j^i = \frac{q_j^{nd}(1-q_j^i)}{q_j^i(1-q_j^{nd})}$

Примечание. y_j^{HR} и y_j^{BR} – соответственно нижняя и верхняя границы интервала изменения j -го ПК; y_j^{nd} – предельно допустимое значение j -го ПК; $k > 1$ – параметр, определяющий вид нелинейной частной абсолютной оценки q_j для j -го ПК; $j=1,2,\dots, m$.

Требования к качеству ОС выполняются при $q_j^i \geq q_j^{nd}$, т.е. при $y_j^i \leq y_j^{nd}$. При этом частная относительная оценка d_j^i некачественности территории i -го геообъекта по j -му ПК, как функция величин q_j^{nd} и q_j^i , должна удовлетворять следующим условиям:

- 1) $0 \leq d_j^i \leq 1$ при $q_j^i \geq q_j^{nd}$;
- 2) $d_j^i = 0$ при $q_j^{nd} = 0, q_j^i > 0$ (оценка минимальна, если нет никаких требований к качеству);
- 3) $d_j^i = 0$ при $q_j^i = 1$ и $q_j^i > q_j^{nd}$ (оценка минимальна при «идеальном» качестве независимо от требований);
- 4) $d_j^i = 1$ при $q_j^i = q_j^{nd} \neq 0$ (оценка максимальна при предельно низком допустимом качестве).

В работе [5] показано, что этим условиям удовлетворяют частные относительные оценки d_j^i , приведенные в табл. 1. Если показатели y_j «устроены» по принципу «чем меньше его значение, тем выше качество ОС», то для частной относительной оценки d_j некачественности антропогенно измененных территорий, «устроенной» по принципу «чем меньше, тем лучше», предлагается использовать следующую формулу:

$$d_j^i = \left[\frac{y_j^{HR}}{y_j^{BR}} \left(1 - \frac{y_j^{HR}}{y_j^i} \right) \right] / \left[\frac{y_j^{HR}}{y_j^i} \left(1 - \frac{y_j^{HR}}{y_j^{BR}} \right) \right], \quad (15)$$

где $q_j^i = \frac{y_j^{HR}}{y_j^i}$, $q_j^{nd} = \frac{y_j^{HR}}{y_j^{BR}}$.

Так как всегда $y_j^i \leq y_j^{\max}$, то выполняется и условие $q_j^i \geq q_j^{\text{пл}}$. Формула (15) применима в случае, когда по некоторым ПК экологические требования не выполняются.

Приведем интерпретацию частных оценок качества d_j на языке субъективной вероятности [5]. Будем считать, что если частная оценка q_j хотя бы по одному ПК ниже соответствующего нормативного уровня $q_j^{\text{пл}}$, то удовлетворить требование к интегральному качеству геообъекта невозможно. Пусть A – событие, состоящее в том, что не выполнено требование к интегральному качеству, а B_j – событие, состоящее в том, что не выполнено требование к качеству геообъекта по j -му ПК. \bar{B}_j – событие, противоположное событию B_j . Тогда $P(A|\bar{B}_j)$ – условная вероятность невыполнения требований к качеству геообъекта при необходимом (но может быть недостаточном в силу каких-либо обстоятельств) условии, что требования к качеству геообъекта выполнены по j -му ПК. Эта вероятность определяется по формуле [5]:

$$P(A|\bar{B}_j) = \{P(B_j)[1 - P(B_j|A)]\} / \{P(B_j|A)[1 - P(B_j)]\}. \quad (16)$$

Введем следующие обозначения: $d_j = P(A|\bar{B}_j)$, $q_j^{\text{пл}} = P(B_j)$ – вероятность некачественности всех геообъектов по j -му ПК, $q_j = P(B_j|A)$ – вероятность некачественности всех геообъектов по j -му ПК при условии, что требования к качеству геообъекта не выполнены. Таким образом, формула (16) совпадает с формулой частной относительной оценки d_j (табл. 1).

Рассмотрим ситуацию, когда экологическое состояние антропогенно измененных территорий характеризуется двумя частными ПК – y_1 и y_2 . Пусть d_1 и d_2 – соответствующие частные относительные оценки качества/некачественности ОС по этим ПК, а $d = d(d_1, d_2)$ – интегральная оценка, которая рассматривается как результат некоторой операции над этими частными оценками.

Как показано в работах [5-6], интегральная оценка качества/некачественности ОС в этом случае имеет следующий вид:

$$d = d_1 + d_2 - d_1 d_2 = 1 - (1 - d_1)(1 - d_2) = 1 - \prod_{j=1}^2 (1 - d_j). \quad (17)$$

Отметим, что формула (17) совпадает с формулой вероятности суммы двух совместных независимых событий. Это позволяет использовать ее для агрегирования частных относительных оценок качества, имеющих вероятностный смысл (табл. 1).

В общем случае для m неравноценных частных оценок d_j интегральная оценка качества/некачественности геообъектов вычисляется по формуле [5-6]:

$$d = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - d_j]^{v_j} . \quad (18)$$

Здесь v_j – весовые коэффициенты частных оценок d_j , удовлетворяющие условию (6), $j=1,2,\dots,m$. Данная оценка является средневзвешенной «квазигеометрической» величиной [6]. При этом $0 \leq d \leq 1$. Чем меньше ее значение, тем выше качество ОС.

Для двух частных оценок d_1 и d_2 с весовыми коэффициентами $v_1 = 0.75$ и $v_2 = 0.25$ соответственно величина $0.75 d_1 + 0.25 d_2$ является средневзвешенным арифметическим, величина $d_1^{0.75} d_2^{0.25}$ – средневзвешенным геометрическим, а величина $[1 - (1 - d_1)^{0.75} (1 - d_2)^{0.25}]$ – средневзвешенным квазигеометрическим. Эти величины удовлетворяют следующим неравенствам:

$$\begin{aligned} 0.75 d_1 + 0.25 d_2 &= 0.5 d_1 + (0.25 d_1 + 0.25 d_2) = 0.5 d_1 + 0.5 (0.5 d_1 + 0.5 d_2) \geq \\ &\geq 0.5 d_1 + 0.5 d_1^{0.5} d_2^{0.5} \geq d_1^{0.5} (d_1^{0.5} d_2^{0.5}) = d_1^{0.75} d_2^{0.25} . \end{aligned}$$

Т.к. $0.75 (1 - d_1) + 0.25 (1 - d_2) \geq (1 - d_1)^{0.75} (1 - d_2)^{0.25}$, то $1 - (0.75 d_1 + 0.25 d_2) \geq (1 - d_1)^{0.75} (1 - d_2)^{0.25}$.

Отсюда следует, что $1 - (1 - d_1)^{0.75} (1 - d_2)^{0.25} \geq 0.75 (1 - d_1) + 0.25 (1 - d_2) \geq d_1^{0.75} d_2^{0.25}$.

В общем случае для m частных оценок d_j имеет место неравенство [6]:

$$\left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j)^{v_j} \right] \geq \sum_{j=1}^m v_j d_j \geq \prod_{j=1}^m d_j^{v_j} .$$

Таким образом, средневзвешенное квазигеометрическое является оценкой «сверху» для средневзвешенного арифметического и средневзвешенного геометрического («целое больше суммы частей, его составляющих»).

Для содержательной интерпретации интегральной оценки качества/некачественности антропогенно измененных территорий предлагается использовать «зеркальную» вербально-числовую шкалу Харрингтона (табл. 2).

Таблица 2

Степень экологической опасности антропогенно измененных территорий в вербально-числовой шкале Харрингтона

№ п/п	Содержательное описание градации	Численное значение
1	очень высокая	(0.8, 1)
2	высокая	(0.63, 0.8]
3	средняя	(0.37, 0.63]
4	низкая	(0.2, 0.37]
5	очень низкая	(0, 0.2]

Рассмотрим применение интегральной оценки экологической опасности антропогенно

измененных территорий для измерения уровня загрязнения водных ресурсов в 32 муниципальных районах Воронежской области. Медико-экологическая ситуация в изучаемом регионе является достаточно напряженной. Загрязнение воды будем оценивать с точки зрения двух приоритетных ПК: y_1 – «содержание железа в воде, мг/дм³», y_2 – «содержание марганца в воде, мг/дм³».

На рис. 2 показано визуальное представление индексов качества ОС в категориях средних величин, а на рис. 3 – результаты построения обобщенной функции «нежелательности» Харрингтона и интегральной оценки экологической опасности территорий (степени загрязнения водных ресурсов) в муниципальных районах Воронежской области.

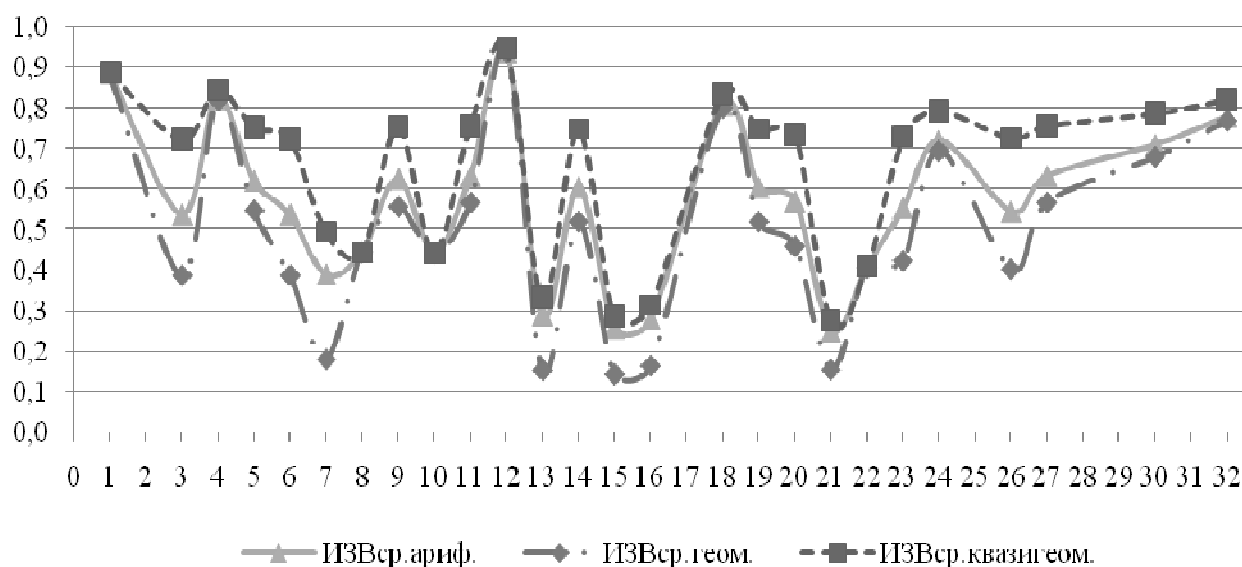


Рис. 2. Графическое представление индексов загрязнения воды типа средневзвешенных величин.

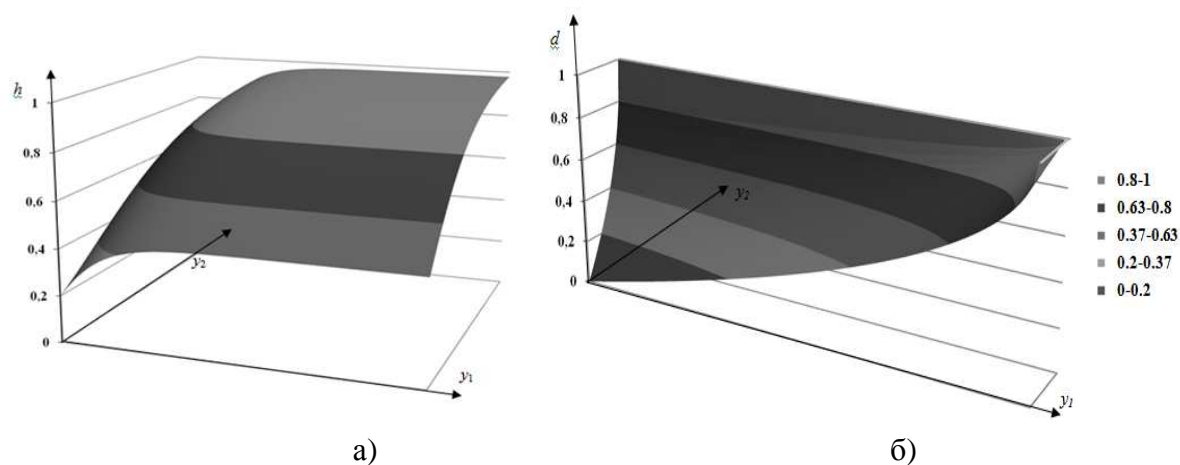


Рис. 3. Визуальное представление обобщенной функции «нежелательности» и интегральной оценки экологической опасности территорий (химического загрязнения воды)

в муниципальных районах Воронежской области в вербально-числовой шкале Харрингтона: y_1 – «содержание железа в воде»; y_2 – «содержание марганца в воде»; h – обобщенная функция «нежелательности» (а); d – интегральная оценка степени загрязнения воды (б).

Предлагаемая в настоящей статье интегральная оценка экологической опасности антропогенно нарушенных территорий, которая вычисляется по формуле (18), отличается от известных тем, что:

- 1) имеет содержательную (системную) и вероятностную интерпретации;
- 2) позволяет непосредственно учитывать экологические требования (нормативы) к качеству ОС;
- 3) позволяет учитывать интервалы изменений частных ПК;
- 4) частные ПК могут быть измерены в различных шкалах (шкале отношений, интервальной шкале, в порядковой шкале, в виде балльных оценок);
- 5) возможен учет неравноценности частных оценок экологической опасности территорий на основе определения их весовых коэффициентов;
- б) интегральная оценка является адаптивной оценкой, позволяющей при необходимости расширять перечень частных ПК и корректировать их экологические нормативы и интервалы изменения.

Автор выражает благодарность научному руководителю профессору Воронежского государственного университета, доктору географических наук В.М. Умывакину за полезное обсуждение работы и ценные замечания.

Список литературы

1. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. – М. : Изд-во стандартов, 1973. – 172 с.
2. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). – Екатеринбург : УИФ «Наука», 1994. – 280 с.
3. Гелашвили Д.Б., Захаров В.М., Королев А.А. Интегральная оценка эколого-экономической информации // На пути к устойчивому развитию: региональная экологическая политика / Центр экологической политики России. – М., 2004. – № 29. – С. 13-16.
4. Дмитриев В.В. Развитие методологии интегральной оценки экологической целостности геосистем / В.В. Дмитриев [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8. – С. 78-85.
5. Зибров Г.В., Умывакин В.М., Матвиец Д.А. Геоэкологическая квалиметрия природно-

хозяйственных территориальных систем // Экологические системы и приборы. – 2011. – № 5. – С. 3-9.

6. Зибров Г.В., Умывакин В.М., Швец А.В. Квалиметрические модели вербально-числового анализа экологической опасности территорий природно-хозяйственных геосистем // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 112-118.

7. Орлов А.И. Прикладная теория измерений // Прикладной многомерный статистический анализ. – М. : Наука, 1978. – С. 68-138.

8. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.

9. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / Институт экологии Волжского бассейна РАН. – Тольятти, 2003. – 463 с.

Рецензенты:

Куролап С.А., д.г.н., профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и мониторинга окружающей среды Воронежского государственного университета, г. Воронеж;

Косинова И.И., д.г.-м.н., профессор, заведующая кафедрой экологической геологии Воронежского государственного университета, г. Воронеж.