

*В.В. Михайлов, В.М. Умывакин, В.А. Драбенко, В.А. Бударина, А.В. Швец*

**ДИАГНОСТИКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ГЕООбЪЕКТОВ ПРИ НЕВЫПОЛНЕНИИ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

*V.V. Mikhaylov, V.M. Umyvakin, V.A. Drabenko, V.A. Budarina, A.V. Shvets*

**DIAGNOSTICS OF THE ECOLOGICAL CONDITION OF NATURAL AND ECONOMIC GEOOBJECTS AT FAILURE TO MEET REQUIREMENTS TO QUALITY OF ENVIRONMENT**

*В работе предлагается научно-методический аппарат диагностики экологического состояния природно-хозяйственных геообъектов на основе построения частных и интегральной оценок качества/загрязнения окружающей среды.*

*Ключевые слова: природно-хозяйственный геообъект, экологическая диагностика, частные и интегральная оценки качества/загрязнения окружающей среды.*

*In work the scientific and methodical device of diagnostics of an ecological condition of natural and economic geoobjects on the basis of construction private and integrated estimates of quality/environmental pollution is offered.*

*Key words: natural and economic geoobject, ecological diagnostics, private and integrated estimates of quality/environmental pollution.*

В настоящей работе качество окружающей среды рассматривается как система с иерархической структурой и представляется в виде «дерева» экологических качеств [1] природно-хозяйственных геообъектов. Нижний уровень «дерева» качеств содержит определенный набор приоритетных частных показателей качества (ПК) окружающей среды (ОС).

Основные технологические этапы построения интегральной оценки качества/загрязнения ОС анализируемых геообъектов приведены на рис. 1.

Обозначим через  $y_j^i$  значение  $j$ -го ПК для  $i$ -го геообъекта,  $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, m$ ;  $a_j$  и  $b_j$  — соответственно нижняя и верхняя границы интервала изменения  $j$ -го ПК;  $y_j^*$  — предельно-допустимое значение  $j$ -го ПК для всех геообъектов, определяющее нормативные требования к качеству ОС.

Будем считать, что качество ОС по  $j$ -му ПК для  $i$ -го геообъекта соответствует нормативным экологическим требованиям, если выполняется условие  $y_j^i \leq y_j^*$ .

Один из ключевых технологических этапов построения интегральной оценки качества/загрязнения ОС геообъектов является выбор способа перехода от значений  $y_j^i$  и  $y_j^*$  к безразмерным величинам:  $\mu_j^i = \mu_j^i(y_j^i, a_j, b_j)$  — частным абсолютным оценкам качества ОС для  $i$ -го геообъекта и  $\varepsilon_j = \varepsilon_j(y_j^*)$  — нормативному экологическому уровню, соответствующему предельно-допустимому значению по  $j$ -му ПК для всех геообъектов. Причем, для каждого ПК такой переход может осуществляться различными способами (табл. 1).

1. Разработка семантической модели задачи экологической диагностики геообъектов
    - 1.1. Формирование перечня анализируемых геообъектов
    - 1.2. Построение «дерева» экологических качеств геообъектов
    - 1.3. Определение списка приоритетных частных ПК
    - 1.4. Обоснование и описание шкал измерений частных ПК
- 
2. Построение интегральной оценки качества/загрязнения ОС геообъектов
    - 2.1. Построение матрицы исходных данных (таблицы типа «геообъект–ПК»)
    - 2.2. Определение интервала изменения частных ПК
    - 2.3. Задание предельно-допустимых значений частных ПК
    - 2.4. Построение частных абсолютных оценок качества ОС геообъектов
    - 2.5. Расчет частных относительных оценок качества/загрязнения ОС геообъектов
    - 2.6. Определение весовых коэффициентов частных относительных оценок качества/загрязнения ОС геообъектов
    - 2.7. Построение («корректировка») интегральной оценки качества/загрязнения ОС геообъектов
    - 2.8. Ранжирование геообъектов по интегральной оценке качества/загрязнения ОС

Рис. 1. Основные этапы автоматизированной технологии построения интегральной оценки качества/загрязнения окружающей среды природно-хозяйственных геообъектов

Таблица 1

**Различные виды частной абсолютной оценки качества окружающей среды геообъектов и их нормативного экологического уровня**

№ п/п	Абсолютная оценка	Нормативный уровень
1	$\mu_j^i = \frac{a_j}{y_j^i}$	$\varepsilon_j = \frac{a_j}{y_j^*}$
2	$\mu_j^i = \frac{b_j - y_j^i}{b_j - a_j}$	$\varepsilon_j = \frac{b_j - y_j^*}{b_j - a_j}$
3	$\mu_j^i = \left[ \frac{b_j - y_j^i}{b_j - a_j} \right]^\beta$	$\varepsilon_j = \left[ \frac{b_j - y_j^*}{b_j - a_j} \right]^\beta$

Примечание:  $a_j, b_j$  — нижняя и верхняя границы интервала изменения  $j$ -го ПК;  $\beta$  — параметр, определяющий вид нелинейного преобразования.

Для построения частной относительной оценки  $d_j^i$  качества/загрязнения ОС по  $j$ -му ПК для  $i$ -го геообъекта в квалиметрической шкале [0, 1] предлагается использовать следующую формулу [4]:

$$d_j^i = \frac{\left[ \varepsilon_j (1 - \mu_j^i) \right]}{\left[ \mu_j^i (1 - \varepsilon_j) \right]}, \tag{1}$$

где  $\mu_j^i = a_j/y_j^i$ ;  $\varepsilon_j = a_j/b_j$ .

В работах [3–5] введена интегральная оценка качества/загрязнения ОС геообъектов следующего вида:

$$d = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j)^{\lambda_j}, \quad (2)$$

где  $\lambda_j$  — весовой коэффициент частной относительной оценки, удовлетворяющий условию:

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1, \quad \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Интегральная оценка (2) является средней величиной по Коши [2], средневзвешенной «квазигеометрической» величиной в смысле ассоциативного среднего по А.Н. Колмогорову [3] и удовлетворяет принципу «ограниченной компенсации», т.е. условию невозможности улучшения значений некоторых частных ПК за счет компенсации значительного снижения качества ОС по другим частным показателям.

Данная оценка позволяет квалифицированно ранжировать анализируемые геообъекты в вербально-числовой шкале Харрингтона по уровню загрязнения ОС (табл. 2).

Таблица 2

Уровень загрязнения окружающей среды геообъектов в шкале Харрингтона [8]

№ п/п	Содержательное описание градаций	Числовое значение
1	очень высокий	(0,8, 1)
2	высокий	(0,63, 0,8]
3	средний	(0,37, 0,63]
4	низкий	(0,2, 0,37]
5	очень низкий	(0, 0,2]

Эта шкала позволяет автоматизировать процедуру содержательной интерпретации полученных результатов. Отметим, что точка  $d_e = 1 - 1/e \approx 0,63$  является точкой перехода экологического состояния геообъектов в «некачественное» (критическое) состояние.

На практике часто возникает экологическая ситуация, когда существуют группа геообъектов, для которых все нормативные требования к качеству ОС выполнены, так и группа геообъектов, для которых часть требований не выполняется. В этом случае предлагается сначала проранжировать по интегральной оценке качества/загрязнения ОС геообъекты первой группы, а затем геообъекты второй группы «вставить» в первоначальную ранжировку. Таким образом, необходима разработка метода инвариантной «корректировки» (с сохранением первоначальной ранжировки) интегральных оценок качества/загрязнения ОС с учетом дополнительной информации об экологическом состоянии «новых» геообъектов. Инвариантность переранжировки означает, что геообъекты второй группы получают свою интегральную оценку качества/загрязнения ОС в вербально-числовой шкале, выработанной для первоначального списка геообъектов.

Пусть к первоначальному списку из  $N$  геообъектов первой группы, добавлены  $L$  «новых» геообъектов второй группы с тем же набором ПК, которым соответствуют значения  $y_j^i$  частных ПК,  $j = 1, 2, \dots, m; i = N+1, N+2, \dots, N+L$ . Необходимо ранжировать (упорядочить) расширенный список геообъектов по уровню загрязнения ОС с сохранением ранжировки геообъектов первой группы. Если в «первоначальном» ранжировании один геообъект лучше другого (или они равноценны), то добавление геообъектов второй группы не должно изменить уже имеющиеся отношения предпочтительности (эквивалентности). Таким образом, при получении новой информации требуется «скорректировать» интегральные квалиметрические оценки всех  $(N+L)$  геообъектов.

С появлением геообъектов второй группы изменяется исходная экспертная информация, необходимая для построения интегральной оценки качества/загрязнения ОС расширенного списка геообъектов.

А именно, заданы: новые интервалы изменения  $j$ -го ПК —  $[A_j, B_j]$ , где  $A_j \leq a_j$  и  $b_j \leq B_j$ ; экологические нормативы —  $Y_j^*$ . Предполагается, что для каждого ПК остаются без изменения способ построения частных абсолютных оценок качества  $\mu_j^i$  (см. табл. 1) и значения весовых коэффициентов  $\lambda_j$  частных относительных оценок  $d_j^i$ . Для всего списка  $(N+L)$  геообъектов с учетом новой экспертной информации частная абсолютная оценка  $M_j^i$  качества ОС по  $j$ -му ПК для  $i$ -го геообъекта имеет вид аналогичный виду  $\mu_j^i$  в табл. 1. Частная относительная  $D_j^i$  по  $j$ -му ПК и интегральная  $D^i$  оценки некачественности ОС  $i$ -го геообъекта вычисляются по формулам:

$$D_j^i = \frac{[E_j(1 - M_j^i)]}{[M_j^i(1 - E_j)]}, \quad (4)$$

$$D^i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - D_j^i)^{\lambda_j}, \quad i = 1, 2, \dots, N + L, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Подчеркнем, что ранжировки первоначального списка  $N$  геообъектов по значениям  $D^i$  и  $d^i$  будут отличаться друг от друга. Поэтому необходимо «скорректировать» значения величин  $M_j^i$ , чтобы «включить» новые геообъекты в первоначальную ранжировку по значениям  $d^i$ . Для этого необходимо найти преобразование  $\hat{M}_j^i = F(M_j^i)$  и вычислить значения частных относительных  $\hat{D}_j^i$  и интегральной  $\hat{D}^i$  оценок качества/загрязнения ОС геообъектов по формулам:

$$\hat{D}_j^i = \frac{[E_j(1 - \hat{M}_j^i)]}{[\hat{M}_j^i(1 - E_j)]}, \quad (6)$$

$$\hat{D}^i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \hat{D}_j^i)^{\lambda_j}. \quad (7)$$

Эти оценки обладают следующими свойствами: 1) если  $d^i > d^l$ , то и  $\hat{D}^i > \hat{D}^l$ ; 2) если  $d^i = d^l$ , то и  $\hat{D}^i = \hat{D}^l$ ;  $i, l = 1, 2, \dots, N$ .

На основе данного свойства можно показать, что скорректированная абсолютная оценка  $\hat{M}_j^i$  качества ОС по  $j$ -му ПК для  $i$ -го геобъекта вычисляется по следующей формуле [5]:

$$\hat{M}_j^i = \frac{E_j}{\left[ 1 - \gamma_j \left( 1 - \frac{\varepsilon_j}{\mu_j^i} \right) \right]}, \quad (8)$$

где  $\gamma_j$  — некоторая неотрицательная величина.

В табл. 3 представлены формулы корректировки для некоторых частных абсолютных оценок качества ОС.

Таблица 3

Формулы корректировки частных абсолютных оценок качества окружающей среды

№ п/п	Способы нормировки	Скорректированная абсолютная оценка
1	$\mu_j^i = \frac{a_j}{y_j^i}, \quad M_j^i = \frac{A_j}{y_j^i}$	$\hat{M}_j^i = \frac{E_j}{\left[ 1 - \gamma_j \left( 1 - \frac{\varepsilon_j}{p_j M_j^i} \right) \right]},$ где $p_j = a_j/A_j; 0 < \gamma_j \leq [1 - E_j]/[1 - \varepsilon_j A_j/a_j]$
2	$\mu_j^i = \frac{b_j - y_j^i}{b_j - a_j}, \quad M_j^i = \frac{B_j - y_j^i}{B_j - A_j}$	$\hat{M}_j^i = \frac{E_j}{\left[ 1 - \gamma_j \left( 1 - \frac{\varepsilon_j}{(p_j M_j^i + q_j)} \right) \right]},$ где $p_j = (B_j - A_j)/(b_j - a_j); q_j = (b_j - B_j)/(b_j - a_j);$ $0 < \gamma_j \leq [1 - E_j]/[1 - \varepsilon_j (b_j - a_j)/(b_j - A_j)]$
3	$\mu_j^i = \left[ \frac{b_j - y_j^i}{b_j - a_j} \right]^{\beta_j}, \quad M_j^i = \left[ \frac{B_j - y_j^i}{B_j - A_j} \right]^{\beta_j}$	$\hat{M}_j^i = \frac{E_j}{\left[ 1 - \gamma_j \left( 1 - \frac{\varepsilon_j}{\left[ p_j (M_j^i)^{1/k} + q_j \right]^k} \right) \right]},$ где $p_j = (B_j - A_j)/(b_j - a_j); q_j = (b_j - B_j)/(b_j - a_j);$ $0 < \gamma_j \leq [1 - E_j]/[1 - \varepsilon_j (p_j + q_j)^k]$

Рассмотрим применение предлагаемого методического подхода к квалиметрическому моделированию интегральной оценки загрязнения ОС природно-хозяйственных геобъектов для диагностики уровня загрязнения водных ресурсов в 32 муниципальных районах Воронежской области при невыполнении некоторых санитарно-гигиенических требований к качеству воды.

Химическое загрязнение воды будем оценивать с точки зрения двух ПК:  $y_1$  — «содержание железа в воде» и  $y_2$  — «содержание марганца в воде». На рис. 2 дано визуальное представление интегральной оценки загрязнения воды в муниципальных районах Воронежской области в шкале Харрингтона.

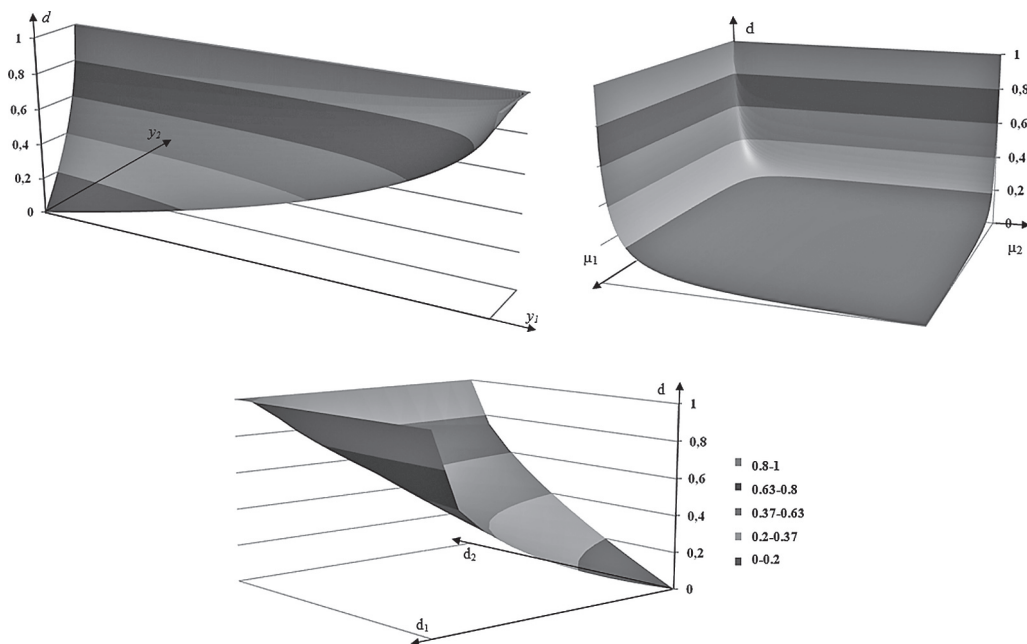


Рис. 2. Визуальное представление интегральной оценки химического загрязнения воды муниципальных районов Воронежской области в шкале Харрингтона:

$y_1$  — «содержание железа в воде»;  $y_2$  — «содержание марганца в воде»;  $\mu_1$  — частная абсолютная оценка по  $y_1$ ;  $\mu_2$  — частная абсолютная оценка по  $y_2$ ;  $d_1$  — частная относительная оценка по  $y_1$ ;  $d_2$  — частная относительная оценка по  $y_2$ ;  $d$  — интегральная оценка качества воды

В табл. 4 представлены результаты построения интегральной оценки загрязнения воды для первоначального списка муниципальных районов с удовлетворительными значениями предельно-допустимых концентраций (ПДК).

К данному списку геообъектов были добавлены «новые» геообъекты, выделенные жирным шрифтом в табл. 4, для которых превышены значения ПДК. выделены геообъекты, добавленные в первоначальный список. Ранжировка геообъектов первоначального списка имеет следующий вид: 21, 15, 16, 13, 22, 10, 8, 7, 3, 6, 26, 23, 20, 14, 19, 5, 9, 11, 27, 30, 24, 32, 18, 4, 1, 12.

В результате «корректировки» интегральной оценки химического загрязнения воды для всех муниципальных районов (для расширенного списка геообъектов) имеем следующую ранжировку : **25, 31, 28**, 21, 15, 16, **17**, 13, 22, 10, 8, 7, 3, 6, 26, 23, 20, 14, 19, 5, 9, 11, 27, 30, 24, 32, 18, 4, 1, 12, **2, 29** (см. табл. 4).

Таблица 4

Абсолютные оценки качества окружающей среды, относительные и интегральная оценки экологической опасности территорий муниципальных районов Воронежской области

№ п/п	$\mu_1$	$\mu_2$	$d_1$	$d_2$	$d$	Ранг	$\hat{M}_1$	$\hat{M}_2$	$\hat{D}_1$	$\hat{D}_2$	$\hat{D}$	Ранг
1	0,192	0,05	0,84	0,90	0,876	25	0,010	0,018	0,884	0,920	0,904	29
2	—	—	—	—	—	—	<b>0,012</b>	<b>0,016</b>	<b>0,699</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>31</b>
3	1	0,05	0	0,90	0,691	9	0,031	0,018	0,276	0,920	0,760	13
4	0,224	0,05	0,69	0,90	0,828	24	0,011	0,018	0,777	0,920	0,866	28
5	0,5	0,05	0,2	0,90	0,723	16	0,021	0,018	0,421	0,920	0,785	20
6	1	0,05	0	0,90	0,691	10	0,031	0,018	0,276	0,920	0,760	14
7	0,227	1	0,68	0	0,434	8	0,011	0,093	0,768	0,165	0,560	12
8	0,382	0,1	0,32	0,43	0,378	7	0,017	0,031	0,511	0,522	0,517	11
9	0,484	0,05	0,21	0,90	0,726	17	0,020	0,018	0,430	0,920	0,787	21
10	0,385	0,1	0,32	0,43	0,376	6	0,017	0,031	0,508	0,522	0,515	10
11	0,467	0,05	0,23	0,90	0,728	18	0,020	0,018	0,441	0,920	0,789	22
12	0,171	0,05	0,97	0,90	0,944	26	0,009	0,018	0,976	0,920	0,957	30
13	0,313	1	0,44	0	0,251	4	0,014	0,093	0,595	0,165	0,418	8
14	0,556	0,05	0,16	0,90	0,717	14	0,022	0,018	0,392	0,920	0,780	18
15	0,357	1	0,36	0	0,2	2	0,016	0,093	0,537	0,165	0,378	5
16	0,333	0,83	0,4	0,01	0,229	3	0,015	0,089	0,566	0,173	0,401	6
17	—	—	—	—	—	—	<b>0,018</b>	<b>0,05</b>	<b>0,471</b>	<b>0,322</b>	<b>0,401</b>	<b>7</b>
18	0,235	0,05	0,65	0,90	0,817	23	0,011	0,018	0,747	0,920	0,858	27
19	0,556	0,05	0,16	0,90	0,717	15	0,022	0,018	0,392	0,920	0,780	19
20	0,714	0,05	0,08	0,90	0,703	13	0,026	0,018	0,334	0,920	0,770	17
21	0,376	0,83	0,33	0,01	0,186	1	0,017	0,089	0,516	0,173	0,367	4
22	0,455	0,1	0,24	0,43	0,340	5	0,019	0,031	0,450	0,522	0,487	9
23	0,840	0,05	0,04	0,90	0,697	12	0,028	0,018	0,304	0,920	0,764	16
24	0,313	0,05	0,44	0,90	0,769	21	0,014	0,018	0,595	0,920	0,820	25
25	—	—	—	—	—	—	<b>1</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>0,152</b>	<b>0,079</b>	<b>1</b>
26	0,926	0,05	0,02	0,90	0,693	11	0,030	0,018	0,288	0,920	0,762	15
27	0,467	0,05	0,23	0,90	0,728	19	0,020	0,018	0,441	0,920	0,789	23
28	—	—	—	—	—	—	<b>0,016</b>	<b>0,192</b>	<b>0,531</b>	<b>0,071</b>	<b>0,340</b>	<b>3</b>
29	—	—	—	—	—	—	<b>0,009</b>	<b>0,05</b>	<b>1</b>	<b>0,322</b>	<b>1</b>	<b>32</b>
30	0,326	0,05	0,41	0,90	0,763	20	0,015	0,018	0,576	0,920	0,816	24
31	—	—	—	—	—	—	<b>0,022</b>	<b>0,238</b>	<b>0,399</b>	<b>0,054</b>	<b>0,246</b>	<b>2</b>
32	0,255	0,05	0,58	0,90	0,800	22	0,012	0,018	0,699	0,920	0,845	26

В работе [6] предложенная методика «корректировки» квалиметрической интегральной оценки экологической опасности приаэродромных территорий использовалась для решения задач мониторинга шумового загрязнения ОС военных природно-техногенных геообъектов.

### Литература

1. *Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П.* О квалиметрии. — М.: изд-во стандартов, 1973. — 172 с.
2. *Джини К.* Средние величины. — М.: Статистика, 1970. — 448 с.
3. *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.
4. *Михайлов В.В., Умывакин В.М., Драбенко В.А., Швец А.В., Воронин А.А.* Квалиметрическое моделирование интегральной оценки экологической опасности территорий природно-хозяйственных геосистем. // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 31, с. 162–169.
5. *Михайлов В.В., Умывакин В.М., Швец А.В.* Методическое обеспечение системы комплексного экологического мониторинга приаэродромных территорий при техногенном воздействии на окружающую среду военной авиации. // Академические Жуковские чтения. Системы гидрометеорологического, экологического и специального мониторинга: методические аспекты повышения качества функционирования: сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф.; Воронеж 20–21 нояб. 2013 г. — Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014, с. 147–152.
6. *Harrington E.C.Jr.* The desirability function. // *Industrial quality control*, 1965, vol. 21, no. 10, pp. 494–498.