

В.В. Михайлов, В.М. Умывакин, В.А. Драбенко, А.В. Швец, А.А. Воронин

**КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
ТЕРРИТОРИЙ ПРИРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ**

V.V. Mikhailov, V.M. Umyvakin, V.A. Drabenko, A.V. Shvets, A.A. Voronin

**THE QUALIMETRICAL MODELLING
OF THE INTEGRAL ASSESSMENT OF ECOLOGICAL DANGER
OF TERRITORIES OF NATURAL AND ECONOMIC GEOSYSTEMS**

В работе рассматриваются квалиметрические модели интегральной оценки геоэкологического состояния территорий природно-хозяйственных геосистем и их применение для измерения общей эрозионной опасности земель речных водосборов Воронежской области.

Ключевые слова: устойчивое природопользование, природно-хозяйственная геосистема, интегральная оценка экологической опасности территорий.

In article the qualimetric models of an integrated assessment of a geoecological condition of territories of natural and economic geosystems and their application for measurement of the general erosive danger of lands of river reservoirs of the Voronezh region are considered.

Key words: steady using of nature, natural and economic geosystem, integral assessment of ecological danger of territories.

В настоящее время особенно актуальной проблемой управления устойчивым природопользованием является интегральная оценка качества (деградации) территорий в категориях экологической безопасности (опасности) и риска [1–5].

В работе [6, с. 151] экологическая опасность определяется как «вероятность нарушения и деградации окружающей среды в результате антропогенных воздействий, стихийных бедствий и природных катастроф, приводящих к угрозе человеку и его здоровью». Согласно «Инструкции по экологическому обоснованию хозяйственной и иной деятельности» (утв. приказом Минприроды России от 29.11.95, № 539), обоснование хозяйственной деятельности «осуществляется для оценки экологической опасности намечаемых мероприятий, своевременного учета экологических, социальных и экономических последствий воздействия планируемых объектов на окружающую среду». Там же дается определение: «Опасность экологическая – вероятность ухудшения показателей качества природной среды (состояний, процессов) под влиянием природных и техногенных факторов, представляющих угрозу экосистемам и человеку». Далее под экологической опасностью нами понимается возможность (вероятность) потери качества территорий природно-хозяйственных геосистем (ПХГС) в результате неконтролируемой антропогенной деятельности.

ПХГС – это сложный территориально и функционально целостный природно-антропогенный объект, выделенный по определенному принципу (например, бассейновому), имеющий разнокачественные природные и хозяй-

ственные компоненты, взаимосвязанные потоками вещества, энергии и информации. При этом качество территорий ПХГС, оцениваемое как относительно экологических требований (норм), так и с точки зрения их природно-хозяйственной значимости, рассматривается как иерархическая система дифференциальных (частных) свойств геосистемы. На нижнем уровне иерархической структуры («дерева свойств») качество территорий описывается определенным набором природно-хозяйственных показателей – частных показателей качества (ПК).

Важнейшим системным принципом является принцип целостности (эмерджентности), который проявляется в возникновении у геосистемы «новых, интегративных качеств, несвойственных ее компонентам». Принцип целостности имеет две стороны [7, с. 55]: 1) неаддитивность, которая состоит в том, что «свойство системы (целого) не является простой суммой свойств составляющих ее элементов (частей)» и которая характеризует взаимосвязь системы как целого с внешней средой; 2) «свойства системы (целого) зависят от свойств составляющих ее элементов (частей)». При этом объединенные в систему компоненты, как правило, утрачивают часть свойств, присущим им вне системы, а с другой стороны, компоненты, входящие в состав системы, могут приобрести новые свойства. Например, природные компоненты геосистем, подверженные антропогенному воздействию.

Таким образом, для геосистемного анализа проблемных экологических ситуаций на основе квалиметрического подхода необходимо использовать модели и методы неаддитивной интегральной оценки геоэкологического состояния ПХГС. В геоэкологической квалиметрии [2–5] в основном используются следующие интегральные оценки качества сложных ПХГС типа средних величин (табл. 1): аддитивная (средневзвешенная арифметическая) и мультипликативная (средневзвешенная геометрическая). В табл. 1 через d_j обозначена j -я частная относительная оценка некачественности (деградации, экологической опасности) территорий ПХГС по j -му частному ПК.

Таблица 1

Виды средневзвешенных величин – интегральных оценок качества ПХГС

Вид среднего взвешенного	Формула	Функция $\varphi(d_j)$	Функция $\varphi^{-1}(d_j)$
Арифметическое	$d_m = \sum_{j=1}^m \lambda_j d_j$	$\varphi(d_j) = d_j$	$\varphi^{-1}(d_j) = d_j$
Геометрическое	$d_g = \prod_{j=1}^m d_j^{\lambda_j}$	$\varphi(d_j) = \ln(d_j)$	$\varphi^{-1}(d_j) = e^{d_j}$
Квазигеометрическое	$d = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j)^{\lambda_j}$	$\varphi(d_j) = -\ln(1 - d_j)$	$\varphi^{-1}(d_j) = 1 - e^{-d_j}$

Примечание: действительные числа d_j принимают значения из интервала (0, 1).

Весовые коэффициенты λ_j частных оценок d_j удовлетворяют условию:

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

Например, в работе [8] оценками d_j являются нелинейные экспоненциальные функции желательности

$$d_j(z_j) = [\exp(-\exp(-z_j))], \quad (2)$$

где z_j – нормированное значение j -го ПК; \exp – экспоненциальная функция.

Отметим, что аддитивные интегральные оценки и мультипликативные интегральные оценки типа средневзвешенного геометрического не удовлетворяют существенному свойству «ограниченной компенсации», т.е. условию невозможности улучшения значений некоторых частных оценок за счет компенсации сколь угодно большого снижения качества по другим частным оценкам.

Сформулируем следующий набор содержательных требований к интегральной оценке экологической опасности ПХГС, следуя работе [2]: конструируемая оценка должна позволять измерять уровень деградации территорий геосистем; оценка должна быть представлять собой некоторую «сводную» формулу, в которой «объединены» частные относительные оценки экологической опасности по отдельным ПК; методики построения частных оценок должны входить составной частью в методику интегральной оценки; частные оценки и интегральная оценка должны допускать вероятностную интерпретацию; интегральная оценка должна быть адаптивной, позволяющей при необходимости расширять перечень частных ПК [11, 12].

Для построения интегральной оценки экологической опасности территорий нужно иметь относительные частные оценки по каждому ПК. Обозначим через y_j^i – значение j -го ПК i -й ПХГС, а через y_j^* – допустимое значение j -го ПК (нормативное экологическое требование) для всех анализируемых геосистем. Поставим им в соответствие две безразмерные величины, принимающие значения из интервала $[0,1]$: $M_j^i = M_j(y_j^i)$ – абсолютную оценку качества по j -му ПК для i -й ПХГС и $E_j = E_j(y_j^*)$ – соответствующий нормативный уровень. Будем считать, что требование к качеству территорий по j -му ПК для i -й геосистемы выполнено, если $M_j^i \geq E_j$. При этом частная относительная оценка d_j^i экологической опасности i -й ПХГС по j -му ПК, как функция величин E_j и M_j^i , должна удовлетворять следующим условиям: 1) $0 \leq d_j^i \leq 1$ при $M_j^i \geq E_j$; 2) $d_j^i = 0$ при $E_j = 0$, $M_j^i > 0$ (оценка минимальна, если нет никаких требований к качеству); 3) $d_j^i = 0$ при $M_j^i = 1$ и $M_j^i > E_j$ (оценка минимальна при «идеальном» качестве независимо от требований); 4) $d_j^i = 1$ при $M_j^i = E_j \neq 0$ (оценка максимальна при предельно низком допустимом качестве).

В работах [4, 9–14] показано, что при $M_j^i \geq E_j$ условиям (1)–(4) удовлетворяет частная оценка экологической опасности территории ПХГС вида:

$$d_j^i = [E_j(1 - M_j^i)]/[M_j^i(1 - E_j)]. \quad (2)$$

Данная оценка позволяет измерять условную вероятность события, состоящего в том, что требование к интегральному качеству геосистемы не выполняется при выполнении требований к ее качеству по j -му частному ПК.

Проведенное в работе [9] теоретико-математическое обоснование показывает, что требованиям коммутативности (равноценности) и ассоциативности (иерархической одноуровненности) удовлетворяет интегральная оценка вида (операция квазисложения):

$$d = d_1 + d_2 - d_1d_2 = 1 - (1 - d_1)(1 - d_2) = d_1 \oplus d_2. \quad (3)$$

Данная формула совпадает с формулой вероятности суммы независимых событий. Операция квазиумножения на произвольное неотрицательное число λ_j и операция квазиумножения частных оценок имеют следующий вид:

$$\lambda_j \otimes d_j = 1 - (1 - d_j)^{\lambda_j}, \quad (4)$$

$$d = d_1 \otimes d_2 = 1 - \exp\{-\ln[1/(1 - d_1)] \ln[1/(1 - d_2)]\}. \quad (5)$$

В общем случае для m частных ПК интегральная оценка экологической опасности территорий ПХГС является средневзвешенной квазигеометрической величиной (см. таблицу 1) и имеет вид [4, 10]:

$$D^i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j^i)^{\lambda_j}. \quad (6)$$

Здесь λ_j – весовые коэффициенты частных оценок d_j^i , удовлетворяющие условию (1), $j = 1, 2, \dots, m$.

Покажем, что данная оценка является средневзвешенным «квазигеометрическим» в смысле ассоциативного среднего по А.Н. Колмогорову [12].

Ассоциативное среднее для действительных чисел d_1, d_2, \dots, d_m вычисляется по формуле:

$$f(d_1, d_2, \dots, d_m) = \varphi^{-1} \left[\frac{1}{m} \varphi(d_1) + \frac{1}{m} \varphi(d_2) + \dots + \frac{1}{m} \varphi(d_m) \right],$$

где φ – непрерывная строго монотонная функция; φ^{-1} – функция, обратная к ней.

Средневзвешенное для действительных чисел d_1, d_2, \dots, d_m – это величина вида $f(d_1, d_2, \dots, d_m) = \varphi^{-1} [\lambda_1 \varphi(d_1) + \lambda_2 \varphi(d_2) + \dots + \lambda_m \varphi(d_m)]$, где весовые коэффициенты λ_j удовлетворяют условию (1). При $\varphi(d_j) = d_j$, $\varphi(d_j) = \ln(d_j)$, $\varphi(d_j) = -\ln(1 - d_j)$ имеем средневзвешенное арифметическое, геометрическое и «квазигеометрическое» соответственно (см. табл. 1).

Так, для двух частных оценок d_1 и d_2 с весовыми коэффициентами $3/4$ и $1/4$ соответственно величина $3/4d_1 + 1/4d_2$ является средневзвешенным арифметическим, величина $d_1^{3/4} d_2^{1/4}$ – средневзвешенным геометрическим, а величина $[1 - (1 - d_1^{3/4})(1 - d_2^{1/4})]$ – средневзвешенным квазигеометрическим. Эти величины удовлетворяют следующим неравенствам:

$$\begin{aligned} 3/4d_1 + 1/4d_2 &= 1/2d_1 + (1/4d_1 + 1/4d_2) = 1/2d_1 + 1/2(1/2d_1 + 1/2d_2) \geq 1/2d_1 + 1/2d_1^{1/2}d_2^{1/2} \geq \\ &\geq d_1^{1/2}(d_1^{1/2}d_2^{1/2}) = d_1^{3/4}d_2^{1/4}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{4}(1-d_1) + \frac{1}{4}(1-d_2) &\geq (1-d_1)^{3/4}(1-d_2)^{1/4} \rightarrow 1 - (\frac{3}{4}d_1 + \frac{1}{4}d_2) \geq (1-d_1)^{3/4}(1-d_2)^{1/4} \\ &\rightarrow \frac{3}{4}d_1 + \frac{1}{4}d_2 \leq 1 - (1-d_1)^{3/4}(1-d_2)^{1/4}. \end{aligned}$$

$$1 - (1-d_1)^{3/4}(1-d_2)^{1/4} \geq \frac{3}{4}(1-d_1) + \frac{1}{4}(1-d_2) \geq d_1^{3/4}d_2^{1/4}.$$

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

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

Таким образом, средневзвешенное квазигеометрическое является оценкой сверху для средневзвешенного арифметического и средневзвешенного геометрического. При этом для частных оценок d_j экологической опасности территорий ПХГС все средневзвешенные величины (интегральные оценки) принимают значения из интервала $[0,1]$. Чем меньше значение средневзвешенного квазигеометрического (интегральной оценки некачественности ПХГС), тем ниже общая экологическая опасность территорий. В работах [4, 13] для содержательной интерпретации данной оценки предлагается использовать следующую вербально-числовую шкалу Харрингтона (табл. 2).

Таблица 2

Степень экологической опасности территорий по шкале Харрингтона

Ранг	Содержательное описание градаций	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]

Отметим, что величина $d_e = 1 - 1/e \approx 0,63$, которая является особой точкой в шкале Харрингтона, в тоже время является и единичным элементом в алгебре оценок экологической опасности. Действительно, т.к. $d_1 = 1 - \exp\{-\ln[1/(1 - d_1)]\}$, то $d_1 \otimes d_e = d_1$.

Информационную базу исследования составили фондовые материалы, электронные тематические карты и космоснимки на изучаемую территорию, литературные источники и Интернет-ресурсы [14]. Сбор, обработка и анализ геоданных о современном геоэкологическом состоянии речных водосборов Воронежской области производились с использованием стандартных программно-инструментальных средств MS Excel, Statistica, ArcGIS и оригинального программного обеспечения для построения интегральной оценки эрозионной опасности территорий бассейновых ПХГС (рис. 1).

Границы 33 речных водосборов с площадью более 400 км², принадлежащих бассейну р. Дон, выделены на основе обработки находящейся в открытом доступе (http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/) цифровой модели рельефа в виде матрицы высот SRTM (Shuttle Radar Topographic Mapping) на территорию Воронежской области.

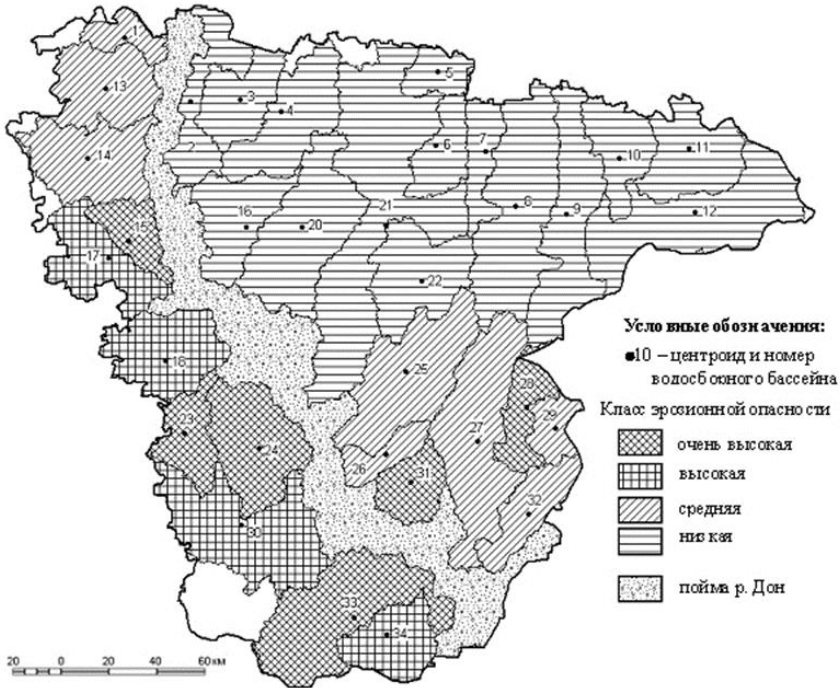


Рис. 1. Интегральная оценочная карта общей эрозионной опасности земель речных водосборов Воронежской области

Сбор и обработка геоанализа произведены по технологии бассейнового гидрологического моделирования в ArcGIS. На основании полученных данных, а также с использованием цифровой топоосновы масштаба 1:100 000 определены их метрические характеристики (площади, центры), а также атрибутивные показатели условий и интенсивности развития линейной эрозии для выделенных водосборов. В частности, ПК «густота овражно-балочной сети, км/км²». Значения ПК «смывость почв с площади сельскохозяйственных угодий, % от площади водосбора» были определены по фондовым материалам и литературным источникам.

На рис. 2 дано графическое представление интегральной оценки экологической опасности территорий бассейновых ПХГС.

На основе интегральной оценки эрозионной деградации земель 33 речных водосборов Воронежской области, вычисленной по формуле (3), и использования шкалы Харрингтона (см. табл. 2) построена интегральная карта эрозионной опасности территорий бассейновых геосистем (см. рис. 1).

Данная оценка позволяет выделить речные водосборы, для которых в первую очередь необходимо разработать и реализовать комплекс программных противоэрозионных мероприятий, снижающих интенсивность эрозионной деградации земель.

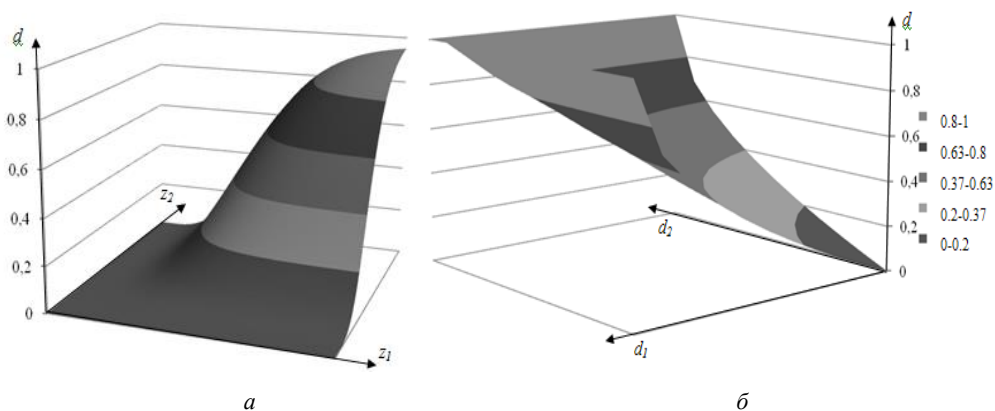


Рис. 2. Визуальное представление интегральной оценки эрозионной деградации территорий речных водосборов Воронежской области в шкале Харрингтона: a – z_1 – нормированный показатель y_1 «смытость почв с площади с.-х. угодий»; z_2 – нормированный показатель y_2 «густота овражно-балочной сети»; b – d_1 – частная оценка по показателю «смытость почв с площади с.-х. угодий»; d_2 – частная оценка по показателю «густота овражно-балочной сети»

В результате проведенного исследования разработан и апробирован на примере Воронежской области научно-методический аппарат квалиметрического подхода к построению неаддитивной интегральной оценки экологической опасности территорий ПХГС, которая является средневзвешенной «квазигеометрической» величиной. Методика построения данной оценки характеризуется оригинальным способом формирования нелинейных (неаддитивных) частных и интегральной оценок, имеющих вероятностный смысл, что позволяет квалифицированно измерять и содержательно интерпретировать общую экологическую опасность территорий ПХГС в универсальной вербально-числовой шкале Харрингтона.

Литература

1. Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие, 2009, № 4, с. 146-165.
2. Зибров Г.В., Умывакин В.М., Матвеец Д.А. Геоэкологическая квалиметрия природно-хозяйственных территориальных систем // Экологические системы и приборы, 2011, № 5, с. 3-9.
3. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. – СПб.: Изд-во СПб. гос. техн. ун-та, 1999. – 512 с.
4. Карлин Л.Н., Музалевский А.А. Рискологические исследования в РГГМУ // Безопасность жизнедеятельности, 2011, № 2, с. 5-19.
5. Каплинский А.И., Руссман И.Б., Умывакин В.М. Алгоритмизация и моделирование слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1991. – 168 с.
6. Колмогоров А.Н. Избранные труды. Математика и механика. – М.: Наука, 1985. – 470 с.
7. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. – М.-Смоленск: Маджента, 2003. – 384 с.
8. Умывакин В.М. Интегральная эколого-хозяйственная оценка и управление земельными ресурсами в регионе. – Воронеж: Воронеж. гос. пед. ун-т, 2002. – 178 с.

9. *Умывакин В.М., Швец А.В., Гедзенко М.О.* Квалиметрия экологической опасности территорий военных природно-техногенных систем // *Наукоемкие технологии*, 2012, т. 13, № 3, с. 34-39.
10. *Умывакин В.М., Пахмелкин А.В., Иванов Д.А.* Геосистемный анализ эрозионно-экологической ситуации на территории речных водосборов для управления устойчивым природопользованием // *Тр. науч.-исслед. ин-та геологии Воронеж. гос. ун-та*, вып. 67. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2012. – 81 с.
11. Уч. зап. РГГМУ, № 24, с. 93-100.
12. *Потапов А.И., Воробьев В.Н., Карлин Л.Н., Музалевский А.А.* Мониторинг, контроль, управление качеством окружающей среды: науч. и учеб.-метод. справ. пособие: в 3 ч. – СПб.: РГГМУ, 2002. Ч. 3. Оценка и управление качеством окружающей среды, 2005. – 598 с.
13. *Шитиков В.Г., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. – М.: Наука, 2005. 281 с.
14. *Harrington E.C.Jr.* The desirability function // *Industrial quality control.*, 1965, vol. 21, № 10, p. 494-498.

Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh)