

# КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭРОЗИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ РЕЧНЫХ ВОДОСБОРОВ

*В.С. Тикунов\**, *В.М. Умывакин\*\**, *Д.А. Иванов\*\**

*\*Московский государственный университет*

*\*\*Воронежский государственный университет*

*г. Воронеж, г. Москва, Россия, umyvakin@mail.ru, ivanov@geol.vsu.ru*

## THE QUALIMETRICAL ASSESSMENTS AND THE MAPPING OF POTENTIAL EROSION DEGRADATION OF TERRITORIES OF THE RIVER RESERVOIRS

*V.S. Tikunov\**, *V.M. Umyvakin\*\**, *D.A. Ivanov\*\**

*\*Moscow State University, Russia*

*\*\*Voronezh State University*

*Voronezh, Moscow, Russia, umyvakin@mail.ru, ivanov@geol.vsu.ru*

**Abstract.** In work qualimetrical models of an integrated assessment of a geocological state anthropogenous the broken territories and their application for measurement of the general erosive danger of lands of river reservoirs of the Voronezh region are considered.

**Keywords:** an integrated assessment, territories of the river reservoirs, the general erosive danger.

**Введение.** В настоящее время актуальной проблемой управления устойчивым развитием регионов является интегральная оценка некачественности/деградации территорий природно-хозяйственных геообъектов. При этом качество антропогенно-измененных территорий описывается определенным набором природно-хозяйственных показателей (частных показателей качества) и оценивается относительно экологических требований.

В эколого-географических исследованиях в основном используются следующие интегральные оценки качества/деградации территорий типа средних величин [1,10]:

аддитивная (средневзвешенная арифметическая)

$$d_m^i = \sum_{j=1}^m \lambda_j d_j^i \quad (1)$$

и мультипликативная (средневзвешенная геометрическая):

$$d_g^i = \prod_{j=1}^m [d_j^i]^{\lambda_j} \quad (2)$$

Здесь:  $d_j^i$  – частная линейная или нелинейная относительная оценка некачественности/деградации территории по  $j$ -му частному показателю качества (ПК) для  $i$ -го геообъекта в квалиметрической шкале  $[0,1]$ ,  $j=1,2,\dots,m$ ;  $i=1,2,\dots,N$ ;  $\lambda_j$  – весовой коэффициент  $j$ -й оценки, удовлетворяющий условию:

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

Например, в работе [11] оценками  $d_j$  являются нелинейные экспоненциальные функции желательности

$$d_j(z_j) = [\exp(-\exp(-z_j))], \quad (4)$$

где  $z_j$  – «кодированное» значение  $j$ -го ПК,  $\exp$  – экспоненциальная функция.

Отметим, что интегральные оценки вида (1)-(2) не удовлетворяют существенному свойству «ограниченной компенсации», т.е. условию невозможности компенсации «хороших» значений некоторых частных ПК за счет низкого уровня деградации территорий по другим частным показателям. Поэтому для геосистемного анализа проблемных эрозионно-экологических ситуаций на основе бассейнового подхода необходимо использовать модели и методы неаддитивной интегральной оценки некачественности/деградации территорий речных водосборов.

**Квалиметрические модели интегральной оценки деградации антропогенно-измененных территорий в классе средневзвешенных величин.** Для построения интегральной оценки деградации территорий природно-хозяйственных геообъектов нужно иметь частные абсолютные и относительные оценки по каждому ПК. Обозначим через  $y_j^i$  – значение  $j$ -го ПК  $i$ -го геообъекта, а через  $y_j^*$  – предельно-допустимое значение  $j$ -го ПК (формализованное нормативное экологическое требование) для всех анализируемых геообъектов. Поставим им в соответствие две безразмерные величины, принимающие значения из интервала  $[0,1]$ :  $M_j^i = M_j(y_j^i)$  – абсолютную оценку качества территории по  $j$ -му ПК для  $i$ -го геообъекта и  $E_j = E_j(y_j^*)$  – соответствующий нормативный уровень. Будем считать, что требование к качеству территорий по  $j$ -му ПК для  $i$ -го геообъекта выполнено, если  $M_j^i \geq E_j$ . При этом частная относительная оценка

$d_j^i$  деградации территории по  $j$ -му ПК для  $i$ -го геобъекта, как функция величин  $E_j$  и  $M_j^i$ , должна удовлетворять следующим условиям:

1.  $0 \leq d_j^i \leq 1$  при  $M_j^i \geq E_j$  (оценка является измерением в квалиметрической шкале  $[0,1]$ );
2.  $d_j^i = 0$  при  $E_j = 0, M_j^i > 0$  (оценка минимальна, если нет никаких требований к качеству территорий);
3.  $d_j^i = 0$  при  $M_j^i = 1$  и  $M_j^i > E_j$  (оценка минимальна при «идеальном» качестве территорий независимо от требований);
4.  $d_j^i = 1$  при  $M_j^i = E_j \neq 0$  (оценка максимальна при предельно низком допустимом качестве территорий).

Построение частных абсолютных оценок качества территорий может осуществляться различными способами, например:

$$M_j^i = \frac{y_j^{\min}}{y_j^i}, \quad E_j = \frac{y_j^{\min}}{y_j^{\max}}. \quad (5)$$

В работах [2, 7] показано, что при  $M_j^i \geq E_j$  условиями 1)-4) удовлетворяет частная относительная оценка некачественности (экологической опасности) территорий природно-хозяйственных геобъектов вида:

$$d_j^i = [E_j(1 - M_j^i)] / [M_j^i(1 - E_j)]. \quad (6)$$

Проведенное в монографии [3] теоретико-математическое обоснование показывает, что требованиям коммутативности (равноценности) и ассоциативности (иерархической одноуровненности) частных относительных оценок удовлетворяет интегральная оценка вида (операция «квазисложения»):

$$d = d_1 + d_2 - d_1 d_2 = 1 - (1 - d_1)(1 - d_2) = d_1 \oplus d_2. \quad (7)$$

Операция квазиумножения на произвольное неотрицательное число  $\lambda_j$  и операция квазиумножения частных оценок имеют следующий вид:

$$\lambda_j \otimes d_j = 1 - (1 - d_j)^{\lambda_j}, \quad (8)$$

$$d = d_1 \otimes d_2 = 1 - \exp\{-\ln[1/(1 - d_1)] \ln[1/(1 - d_2)]\}. \quad (9)$$

В общем случае для  $m$  частных ПК интегральная оценка экологической опасности территорий ПХГС является средневзвешенной квазигеометрической величиной и имеет вид [7]:

$$d^i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j^i)^{\lambda_j}. \quad (10)$$

Здесь  $\lambda_j$  – весовые коэффициенты частных оценок  $d_j^i$ , удовлетворяющие условию (3),  $j=1, 2, \dots, m$ .

Покажем, что данная оценка является средневзвешенным «квазигеометрическим» в смысле ассоциативного среднего по А.Н. Колмогорову [4]. 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  $\varphi$  – непрерывная строго монотонная функция, а  $\varphi^{-1}$  – 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  $\lambda_j$  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. Например, для двух частных оценок  $d_1$  и  $d_2$  с весовыми коэффициентами  $3/4$  и  $1/4$  величина  $3/4 d_1 + 1/4 d_2$  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:

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

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

$$\left[ 1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j)^{\lambda_j} \right] \geq \sum_{j=1}^m \lambda_j d_j \geq \prod_{j=1}^m d_j^{\lambda_j}. \quad (11)$$

Таким образом, средневзвешенное квазигеометрическое является оценкой сверху для средневзвешенного арифметического («целое не есть сумма частей его составляющих») и средневзвешенного геометрического. При этом для частных оценок  $d_j$  деградации антропогенно-измененных территорий все средневзвешенные величины (интегральные оценки) принимают значения из интервала  $[0,1]$ . Чем меньше значение средневзвешенного квазигеометрического (интегральной оценки), тем ниже уровень деградации территорий. В работах [2] для содержательной интерпретации данной оценки предлагается использовать следующую вербально-числовую шкалу Харрингтона (табл. 1).

Отметим, что величина  $d_e = 1 - 1/e \approx 0.63$ , которая является особой («критической») точкой в шкале Харрингтона, в тоже время является и «единичным» элементом в алгебре относительных оценок  $d_j$

некачественности территорий. Действительно, т.к.  $d_1=1-\exp\{-\ln[1/(1-d_1)]\}$ , то  $d_1 \otimes d_e = d_1$ .

Таблица 1

*Уровень некачественности (деградации) территорий по шкале Харрингтона*

Ранг	Содержательное описание градаций	Числовое 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]

**Геоинформационно-аналитические технологии сбора и обработки данных об эрозионной деградации территорий речных водосборов.** Рассмотрим применение геоинформационно-аналитических технологий для интегральной оценки эрозионной деградации территорий речных водосборов Воронежской области. Границы речных водосборов изучаемого региона выделены на основе обработки находящейся в открытом доступе цифровой модели рельефа в виде матрицы высот SRTM (Shuttle Radar Topographic Mapping). В работе использован набор радарных данных  $5^\circ \times 5^\circ$  (6 001x6 001 пиксель) уровня подготовки 4 в диапазоне  $35-45^\circ$  по долготе и  $45x55^\circ$  по широте, из которого составлен единый файл данных на территорию Воронежской области (9 087x3 848 пиксель) с пространственным разрешением около 80 м на пиксель.

Обработка геоданных SRTM на территорию Воронежской области произведена по технологии бассейнового гидрологического моделирования при помощи модуля SpatialAnalystArcGIS. При этом для геоданных SRTM и производных числовых поверхностей последовательно выполнены следующие операции:

- контроль рельефа на отсутствие локальных замкнутых понижений (Fill) с формированием естественно-проточной поверхностно-дренируемой ЦМР. В процессе выполнения данной функции производится фильтрация и сглаживание локальных понижений, имеющих в исходных данных SRTM. Как правило, они связаны с ошибочными флуктуациями принимаемого сигнала;

- расчет направлений стока (Flow Direction). В процессе обработки формируется тематический растр, классифицирующий территорию на восемь классов, соответствующих 45-ти градусным азимутальным зонам. Для данных зон производится осреднение азимутов падений поверхности рельефа по направлениям В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ, С, СВ с присвоением ячейкам значений 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 соответственно;

- расчет кумулятивного стока (Flow Accumulation). Данная функция обрабатывает растр направлений стока с присвоением ячейкам значений, представляющих накопленный сток как сумму ячеек, из которых происходит сток в данную. На сформированном растре ячейкам с нулевым стоком соответствуют водораздельные линии. Ячейки с относительно более высоким стоком используются для программной идентификации водотоков;

- идентификация ячеек водотоков с кумулятивным стоком более заданного. Для данной операции на основе поверхности кумулятивного стока реализуются функции запросов для поиска ячеек водотоков с кумулятивным стоком более заданной величины, например путем построения выражения вида  $FlowAcc > 500$ . Данное выражение определяет последующую генерацию сети водотоков, для которой начальными ячейками водотоков будут те, в которых накапливается сток более чем из 500 ячеек. Таким образом, данное условие определяет густоту построения сети водотоков на основе ЦМР, которая зависит, в первую очередь, от масштаба работ. В ходе работы были построены сети водотоков с граничным кумулятивным стоком 400, 1000 и 2000 ячеек. Для пространственного разрешения SRTM около 80 м, данные граничные значения соответствуют площадям водосборов 2.56, 6.4 и 12.8 км<sup>2</sup>. В работе использована полученная сеть водотоков с кумулятивным стоком более 1000 ячеек, которая, в общем виде, соответствует гидросети топографической карты масштаба 1:200 000;

- идентификация звеньев водотоков (StreamLink). Исходными данными при выполнении данной функции являются: сеть водотоков, построенная на предыдущем шаге, и растр направлений стока. Ячейкам выходного растра, представляющим звенья водотоков, присваиваются уникальные порядковые номера;

- расчет порядка водотоков (StreamOrder) производится на основе покрытий звеньев водотоков и направлений стока. Это методика присвоения числового порядка звеньям в сети водотоков в зависимости от числа их притоков. Здесь используется методика Хортон [9], в которой самым верхним сегментам, или внешним звеньям, всегда присваивается первый порядок. Для остальных звеньев их порядок увеличивается при соединении между собой водотоков одного порядка. Для рассматриваемой территории получены водотоки от 1-го до 7-го порядков. Для векторизации сети водотоков использована функция Водоток в пространственный объект (StreamtoFeature), с помощью которой была сгенерирована топологически корректная линейная сеть;

- расчет водосборных областей (Watershed) производился на основе растра направлений стока и устьевых точек водотоков.

Чтобы избежать излишней детализации водосборных областей из расчета были исключены точки устьев водотоков низких порядков. Построенный растр водосборных площадей преобразован в полигональное покрытие. В результате получено линейное покрытие водотоков с порядками от 1 до 7 и

выделены 33 речных водосбора с площадью более 400 км<sup>2</sup>, принадлежащих бассейну Дона в границах Воронежской области (рис. 1). При этом общее число водотоков звеньев составило более 10 600 штук.

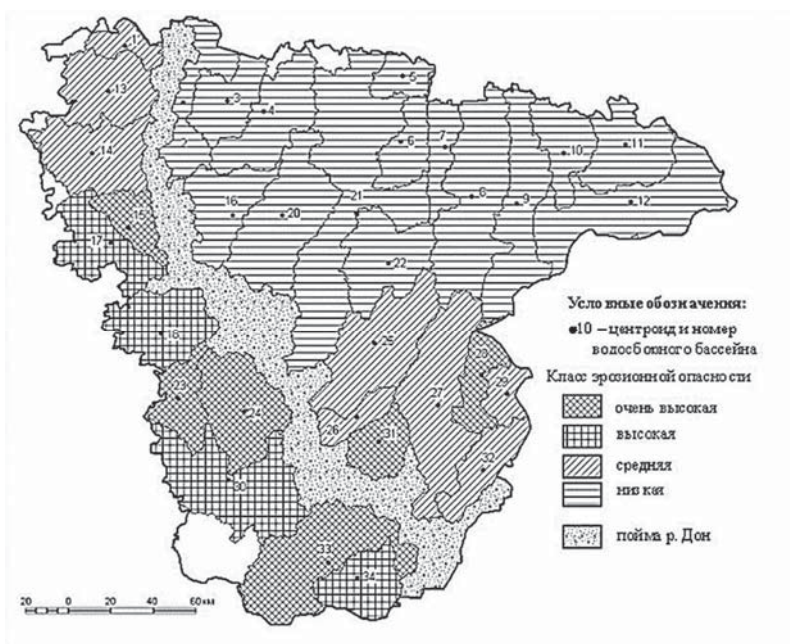
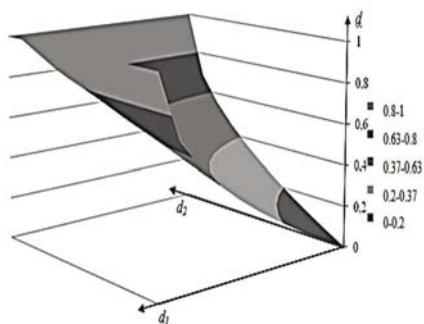


Рис. 1. Интегральная оценочная карта потенциальной эрозионной деградации территорий речных водосборов Воронежской области

В качестве информативных количественных показателей эрозионной деградации территорий речных водосборов Воронежской области приняты:  $y_1$  — «уклон местности более 5°, %»,  $y_2$  — «густота овражно-балочной сети, км/км<sup>2</sup>». Значения этих показателей определены с помощью ГИС-технологий обработки цифровой модели рельефа Воронежской области. На рис. 2 дано графическое представление неаддитивной интегральной оценки потенциальной эрозионной опасности территорий бассейновых геосистем в шкале Харрингтона (табл. 1).



$d_1$  — частная оценка по показателю «уклон местности более 5°»;

$d_2$  — частная оценка по показателю «густота овражно-балочной сети»

Рис. 2. Визуальное представление интегральной оценки потенциальной эрозионной деградации территорий речных водосборов Воронежской области в шкале Харрингтона

На основе многовариантного подхода к картографированию [5] построена оценочно-прогнозная карта потенциальной эрозионной деградации территорий 33 речных водосборов Воронежской области (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 в рамках двухкритериального подхода к управлению устойчивым развитием территорий [7].

**Заключение.** В результате проведенного исследования разработан и апробирован на примере Воронежской области научно-методический аппарат квалиметрического подхода к построению неаддитивной интегральной оценки потенциальной эрозионной деградации территорий речных водосборов, которая является средневзвешенной «квазигеометрической» величиной. Методика построения данной оценки характеризуется оригинальным способом формирования нелинейных частных и интегральной оценок, что позволяет квалифицированно измерять и содержательно интерпретировать уровень общей деградации антропогенно-измененных территорий в универсальной вербально-числовой шкале Харрингтона.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК REFERENCES

1. *Дмитриев В.В.* Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие. 2009. № 4. С. 146–165.  
Dmitriev V.V. Opredelenie integralnogo pokazatelja sostojanija prirodnogo obekta kak slozhnoj sistemy [Definition of an integrated indicator of a condition of natural object as difficult system], Obshhestvo.Sreda. Razvitie, 2009, № 4, P. 146-165 (in Russian).
2. *Зибров Г.В., Умывакин В.М., Матвиец Д.А.* Геоэкологическая квалиметрия природно-хозяйственных территориальных систем // Экологические системы и приборы. 2011. № 5. С. 3–9.  
Zibrov G.V., Umyvakina V.M., Matviec D.A. Geojekologicheskaja kvalimetrija prirodno-hozjajstvennyh territorial'nyh sistem [Geoecologicalkvalimetriya of natural and economic territorial systems], Jekologicheskie sistemy i pribory, 2011, № 5, P. 3–9 (in Russian).
3. *Каплинский А.И., Руссман И.Б., Умывакин В.М.* Моделирование и алгоритмизация слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1991. 168 с.  
Kaplinskij A.I., Russman I.B., Umyvakina V.M. Modelirovanie i algoritmizacija slaboformalizovannyh zadach vybora nailuchshih variantov system, IzdatelstvoVoronezhskogogosudarstvennogouniversiteta, Voronezh, 1991, 168 p. (in Russian).
4. *Колмогоров А.Н.* Избранные труды. Математика и механика. М.: Наука, 1985. 470 с.  
Kolmogorov A.N. Izbrannyetrudy. Matematika i mehanika [Chosen works.Mathematician and mechaic], Nauka, Moscow, 1985, 470 p. (in Russian).
5. *Тикунов В.С.* Моделирование в картографии. М.: Изд-во МГУ, 1997. 405 с.  
Tikunov V.S. Modelirovanie v kartografii [Modeling in cartography], Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, Moscow, 1997, 405 p. (in Russian).
6. *Умывакин В.М.* Квалиметрические модели оценки экологической опасности для природно-хозяйственных систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5. География. 2014. №1. С. 17–23.  
Umyvakina V.M. Kvalimetricheskie modeli ocenki jekologicheskoj opasnosti dlja prirodno-hozjajstvennyh sistem [Qualimetrical models of an assessment of ecological danger to natural and economic systems], Vestnik-MoskovskogoUniversiteta, seria 5, Geografiya, 2014, №1, P. 17–23 (in Russian).
7. *Умывакин В.М., Пахмелкин А.В., Последов С.В.* Двухкритериальный анализ и интегральная оценка качества в управлении устойчивым развитием территорий // ИнтерКарто-ИнтерГИС1-16. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: Материалы междунар. науч. конф.; Ростов-на-Дону (Россия), Зальцбург (Австрия), 3–4 июля 2010 г. Ростов н/Д: Изд-во ЮИЦ РАН, 2010. С. 508–513.  
Umyvakina V.M., Pahmelkin A.V., Posledov S.V. Dvuhkriterialnyj analiz i integralnaja ocenka v upravlenii ustojchivym razvitiem territorij [Two-criterial analysis and integral assessment in the control of the stable development of territories] //InterCarto/InterGIS-16. Sustainable Development of Territories: GIS Theory and Practice: Proseedings of the Internaional Scientific Conference; Rostov-on-Don (Russia), Salzburg (Austria), July 03-04, 2010. Rostov-on-Don: SSCRASPublishers, 2010. P. 508–513 (in Russian).
8. *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: ВГУ, 2012. 81с.  
Umyvakina V.M., Pahmelkin A.V., Ivanov D.A. Geosistemnyj analiz jerozionno-jekologicheskoj situacii na territorii rechnyh vodosborov dlja upravlenija ustojchivym prirodnopol'zovaniem [The geosystem analysis of an erosive and ecological situation in the territory of river reservoirs for management of steady environmental management], Trudy nauchno- issledovatel'skogo institute geologii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, Vypusk 67, Voronezhskijgosudarstvennyuniveritet, Voronezh, 2012, 81 p. (in Russian).
9. *Хортон Р.Е.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М.: Гос. изд-во иностран. лит., 1948. 158 с.  
Horton R.E. Jerozionnoe razvitie rek i vodosbornyh bassejnov.Gidrofizicheskij podhod k kolichestvennoj morfologii [Erosive development of the rivers and catchment basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology], Gosudarstvennoe izdatel'stvo inostrannoju literatury, Moscow, 1948, 158 p. (in Russian).
10. *Шитиков В.Г., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. М.: Наука, 2005. 281 с.  
Shitikov V.G., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. Kolichestvennaja gidrojekologija: metody, kriterii, reshenija [Quantitative hydroecology: methods, criteria, decisions], Nauka, Moscow, 2005, 281 p. (in Russian).
11. *Harrington E. C. Jr.* The desirability function // Industrial quality control. 1965. Vol. 21, №10. P. 494-498.