

# Квалиметрическое моделирование интегральной оценки экологической опасности территорий природно-хозяйственных геосистем

Р. А. ПЕРЕЛЕТ, В. М. УМЫВАКИН, А. В. ШЕВЧУК

**Аннотация.** В работе рассматриваются квалиметрические модели интегральной оценки геоэкологического состояния антропогенно-нарушенных территорий и их применение для измерения общей эрозионной опасности земель речных водосборов Воронежской области.

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

## Введение

В настоящее время особенно актуальной проблемой управления устойчивым природопользованием является интегральная оценка деградации (некачественности) территорий в категориях экологической безопасности (опасности).

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». В работе [2, 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». 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 хозяйственные 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 (ПХП).

Важнейшим системным принципом является принцип целостности (эмерджентности), который проявляется в возникновении у геосистемы «новых, интегративных качеств, несвойственным ее компонентам». Принцип целостности имеет две стороны: 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.

### Квалиметрический анализ геоэкологического состояния территорий природно-хозяйственных геосистем

Для геосистемного анализа проблемных экологических ситуаций необходимо использовать модели и методы неаддитивной интегральной оценки геоэкологического состояния ПХГС. На практике в основном используются следующие интегральные оценки качества сложных геосистем типа средних величин: аддитивная (средневзвешенная арифметическая)

$$Q_1^i = \sum_{j=1}^m \lambda_j z_j^i \quad \text{или} \quad Q_2^i = \sum_{j=1}^m \lambda_j q_j(z_j^i)$$

и мультипликативная (средневзвешенная геометрическая)

$$G_1^i = \prod_{j=1}^m [z_j^i]^{\lambda_j} \quad \text{или} \quad G_2^i = \prod_{j=1}^m [g_j(z_j^i)]^{\lambda_j}.$$

Здесь:  $z_j^i$  — нормированное значение  $j$ -го ПХП  $i$ -й геосистемы из интервала  $[0,1]$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $\lambda_j$  — весовой коэффициент  $j$ -го ПХП, удовлетворяющий условию

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

$q_j$  — нелинейное преобразование, например,  $q_j(z_j) = [z_j]^\beta$ , где параметр  $\beta > 1$ ;  $g_j$  — частная нелинейная функция качества ПХГС по  $j$ -му ПХП, например,  $g_j(z_j) = [\exp(-\exp(-z_j))]$ , где  $\exp$  — экспоненциальная функция [6].

Эти интегральные оценки обладают определенными недостатками, а именно:

- 1) чаще всего аддитивная «свертка» частных ПХП не имеет никакого конкретного геосистемного смысла, когда показатели являются разнородными (разноименными) и/или имеют различную размерность;
- 2) отсутствует возможность их вероятностной интерпретации;
- 3) аддитивные свертки и большинство мультипликативных не удовлетворяют существенному свойству «ограниченной компенсации», т. е. условию невозможности улучшения значений некоторых частных ПХП за счет компенсации сколь угодно большого снижения качества по другим частным показателям.

Сформулируем следующий набор содержательных требований к интегральной оценке экологической опасности ПХГС: конструируемая оценка должна позволять измерять уровень деградации территорий речных водосборов; оценка должна

быть представлять собой некоторую «сводную» формулу, в которой «объединены» частные относительные оценки экологической опасности по отдельным ПХП; 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 ПХП.

Для построения интегральной оценки экологической опасности территорий нужно иметь относительные частные оценки по каждому ПХП. Обозначим через  $y_j^i$  — значение  $j$ -го ПХП  $i$ -й ПХГС, а через  $y_j^*$  — допустимое значение  $j$ -го ПХП (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 ПХП для  $i$ -й ПХГС и  $E_j = E_j(y_j^*)$  — соответствующий нормативный уровень. Будем считать, что требование к качеству территорий по  $j$ -му ПХП для  $i$ -й геосистемы выполнено, если  $M_j \geq E_j$ . При этом частная относительная оценка  $d_j^i$  экологической опасности  $i$ -й ПХГС по  $j$ -му ПХП, 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 работе [1] 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 ПХП. В этом случае интегральная оценка экологической опасности территорий речных водосборов имеет вид [4]:

$$D^i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j^i)^{\lambda_j}. \quad (3)$$

Здесь  $\lambda_j$  — 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.

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 (табл. 1).

Таблица 1

Виды средневзвешенных величин — интегральных оценок качества геосистем

Вид среднего взвешенного	Формула	Функция $\varphi(d_j)$	Функция $\varphi^{-1}(d_j)$
арифметическое	$\sum_{j=1}^m \lambda_j d_j$	$\varphi(d_j) = d_j$	$\varphi^{-1}(d_j) = d_j$
геометрическое	$\prod_{j=1}^m d_j^{\lambda_j}$	$\varphi(d_j) = \ln(d_j)$	$\varphi^{-1}(d_j) = e^{d_j}$
квазигеометрическое	$1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j)^{\lambda_j}$	$\varphi(d_j) = \ln \frac{1}{1 - d_j} = -\ln(1 - d_j)$	$\varphi^{-1}(d_j) = 1 - e^{-d_j}$

Так, для двух частных оценок  $d_1$  и  $d_2$  с весовыми коэффициентами  $3/4$  и  $1/4$  соответственно 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:

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

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

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

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 работе [4] для содержательной интерпретации данной оценки предлагается использовать вербально-числовую шкалу Харрингтона (табл. 2).

Таблица 2

Степень экологической опасности территорий по шкале Харрингтона [6]

№ п/п	Содержательное описание градаций	Численное значение
1	очень высокая	свыше 0,8
2	высокая	0,63–0,8
3	средняя	0,37–0,63
4	низкая	0,2–0,37
5	очень низкая	менее 0,2

### Построение интегральной оценочной карты эрозионной опасности земель речных водосборов Воронежской области

Информационную базу исследования составили фондовые материалы, электронные тематические карты и космоснимки на изучаемую территорию, литературные источники и Интернет-ресурсы. 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 экологической опасности территорий бассейновых геосистем.

Важнейшей структурной единицей изучаемой территории для целей устойчивого природопользования являются речные водосборы. Их границы выделены на основе обработки находящейся в ГИС-центре Воронежского государственного университета цифровой модели рельефа в виде матрицы высот SRTM (Shuttle Radar Topographic Mapping) на территорию Воронежской области. Сбор и обработка геоданных произведены по технологии бассейно-

вого гидрологического моделирования в ArcGIS. В результате получено линейное покрытие водотоков с порядками от 1 до 7 (по Р. Хортону [5]) и выделены 33 речных водосбора с площадью более 400 км<sup>2</sup>, принадлежащих бассейну р. Дон в границах Воронежской области. На основании полученных данных, а также с использованием цифровой топоосновы масштаба 1:100 000 определены их метрические характеристики (площади, центроиды), а также атрибутивные показатели условий и интенсивности развития линейной эрозии для выделенных водосборов.

В частности, ПХП «густота овражно-балочной сети, км/км<sup>2</sup>». Значения ПХП «смывость почв с площади сельскохозяйственных угодий, % от пло-

щади водосбора» были определены по фоновым материалам и литературным источникам (табл. 3).

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

Интегральная оценка эрозионной опасности территорий ПХГС позволяет выделить речные водосборы Воронежской области, для которых в первую очередь необходимо разработать и реализовать комплекс программных противоэрозионных мероприятий, снижающих интенсивность эрозионной деградации земель.

Таблица 3

Природно-хозяйственные показатели, частные и интегральные оценки эрозионной деградации земель речных водосборов Воронежской области

№ п/п	$y_1$ — смывость почв с площади с.-х. угодий, %	$y_2$ — густота овражно-балочной сети, км/км <sup>2</sup>	$d_1$ — частная оценка эрозионной опасности земель для показателя $y_1$	$d_2$ — частная оценка эрозионной опасности земель для показателя $y_2$	$\max \{d_1, d_2\}$	Средне-взвешенное квазигеометрическое	Средне-взвешенное арифметическое	Средне-взвешенное геометрическое	$\min \{d_1, d_2\}$
1	20,8	0,12	0,3929	0,1279	0,3929	0,2590	0,2471	0,2119	0,1279
2	8,5	0,05	0,1094	0,045	0,1094	0,0745	0,0740	0,0671	0,045
3	3,95	0,08	0,0046	0,0851	0,0851	0,0497	0,0488	0,0228	0,0046
4	5,2	0,01	0,0334	0,0006	0,0334	0,0155	0,0154	0,0037	0,0006
5	7,08	0,02	0,0767	0,0123	0,0767	0,0418	0,0413	0,0281	0,0123
6	7,83	0,02	0,094	0,0069	0,094	0,0471	0,0461	0,0224	0,0069
7	7,77	0,19	0,0926	0,2171	0,2171	0,1633	0,1611	0,1480	0,0926
8	11,64	0,10	0,1818	0,1079	0,1818	0,1419	0,1411	0,1364	0,1079
9	10,31	0,25	0,1511	0,2856	0,2856	0,2279	0,2251	0,2144	0,1511
10	8,94	0,15	0,1195	0,1678	0,1678	0,1464	0,1461	0,1441	0,1195
11	11,5	0,08	0,1785	0,0834	0,1785	0,1275	0,1262	0,1175	0,0834
12	9,38	0,11	0,1297	0,1192	0,1297	0,1239	0,1239	0,1238	0,1192
13	18,5	0,28	0,3399	0,3198	0,3399	0,3289	0,3288	0,3287	0,3198
14	20,23	0,52	0,3797	0,6028	0,6028	0,5146	0,5024	0,4896	0,3797
15	28,31	0,78	0,5659	0,9162	0,9162	0,8243	0,7586	0,7376	0,5659
16	10,68	0,10	0,1596	0,1107	0,1596	0,1331	0,1327	0,1305	0,1107
17	31,1	0,57	0,6302	0,6666	0,6666	0,6507	0,6503	0,6500	0,6302
18	35,98	0,58	0,7427	0,6785	0,7427	0,7092	0,7074	0,7067	0,6785
19	8,74	0,03	0,1149	0,0202	0,1149	0,0640	0,0628	0,0441	0,0202
20	8,5	0,15	0,1094	0,1624	0,1624	0,1389	0,1385	0,1359	0,1094
21	12,48	0,04	0,2011	0,04	0,2011	0,1162	0,1125	0,0827	0,04
22	44,15	0,56	0,931	0,6518	0,931	0,8319	0,7774	0,7652	0,6518
23	44,9	0,61	0,9483	0,7109	0,9483	0,8667	0,8177	0,8093	0,7109
24	20,71	0,33	0,3908	0,3836	0,3908	0,3869	0,3869	0,3868	0,3836
25	18,8	0,20	0,3468	0,2217	0,3468	0,2807	0,2780	0,2711	0,2217
26	24,61	0,52	0,4807	0,6052	0,6052	0,5534	0,5492	0,5456	0,4807
27	37,54	0,76	0,7786	0,89	0,89	0,8494	0,8399	0,8381	0,7786
28	31,73	0,55	0,6448	0,6404	0,6448	0,6424	0,6424	0,6424	0,6404
29	42,7	0,32	0,8976	0,3691	0,8976	0,7216	0,6069	0,5506	0,3691
30	25,4	0,81	0,4989	0,9518	0,9518	0,8618	0,7480	0,7117	0,4989
31	32,06	0,45	0,6524	0,5196	0,6524	0,5847	0,5793	0,5756	0,5196
32	43,3	0,65	0,9114	0,7589	0,9114	0,8463	0,8275	0,8241	0,7589
33	38,2	0,48	0,7939	0,5526	0,7939	0,6843	0,6612	0,6505	0,5526

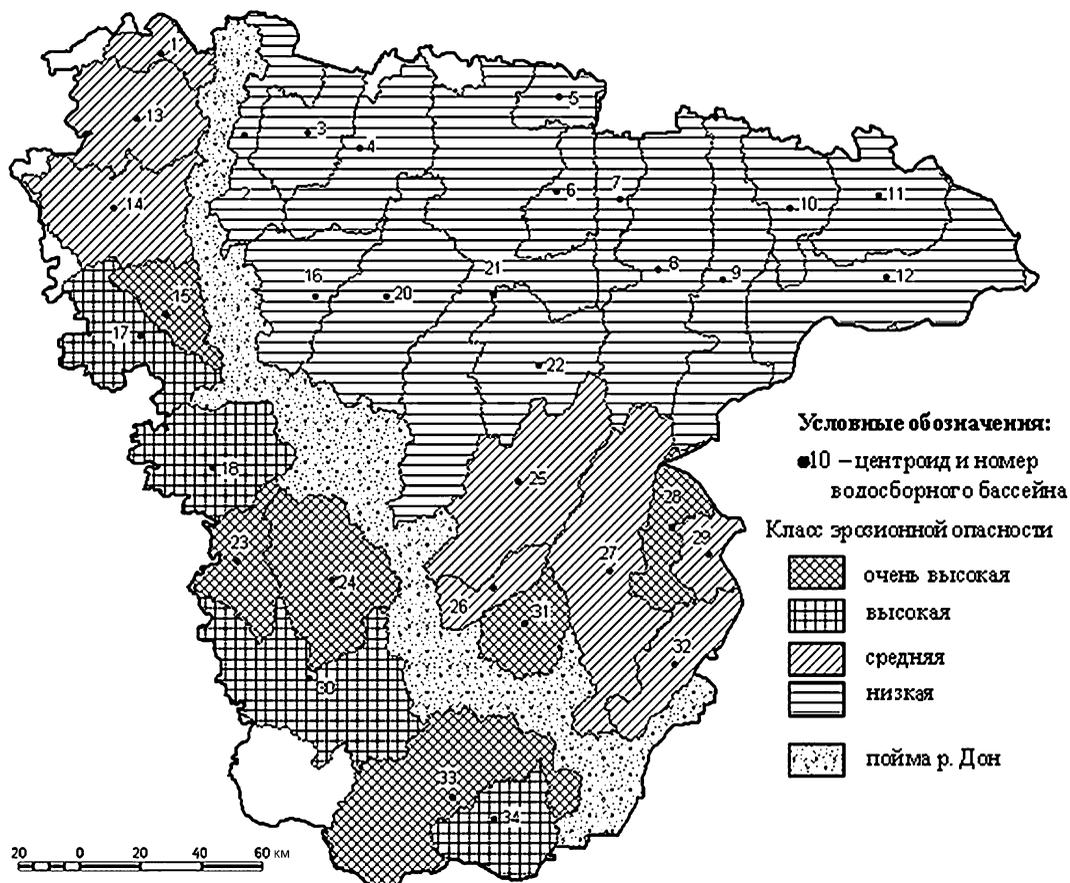


Рис. 1. Интегральная оценочная карта общей эрозионной опасности земель речных водосборов Воронежской области

## Литература

- Каплинский А. И., Русман И. Б., Умывакин В. М. Моделирование и алгоритмизация слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем / Под ред. Я. З. Цыпкина. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1991. 168 с.
- Кочуров Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развитие: учеб. пособие. М.; Смоленск: Маджента, 2003. 384 с.
- Перелет Р. А., Умывакин В. М., Шевчук А. В. Методологические основы создания модельных водных объектов на стадии стратегического планирования устойчивого водопользования // Системный анализ проблемы устойчивого развития: тр. Ин-та систем. анализа РАН / Под ред. С. А. Пегова, Ю. А. Ростопшина. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2009. Т. 42. С. 78–102.
- Умывакин В. М., Пахмелкин А. В., Иванов Д. А. Гео-системный 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. 81 с.
- Хортон Р. Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии / пер. с англ.; под ред. М. А. Великанова. — М.: Гос. изд-во иностран. лит., 1948. 158 с.
- Harrington E. C. Jr. The desirability function / E. C. Jr. Harrington // Industrial quality control. 1965. Vol. 21. № 10. P. 494–498.

**Перелет Ренат Алексеевич.** В. н. с. ИСА РАН. К. э. н. Окончил в 1958 г. Московский энергетический институт. Количество печатных работ: более 150 (в т. ч. 15 монографий). Область научных интересов: экономика устойчивого развития, экологическая безопасность. E-mail: renat@perelet.msk.ru

**Умывакин Василий Митрофанович.** Профессор Воронежского ГУ. Доктор географических наук. Окончил в 1974 г. ВГУ. Количество печатных работ: 165. Область научных интересов: принятие эколого-экономических решений для целей устойчивого природопользования. E-mail: umyvakin@mail.ru

**Шевчук Анатолий Васильевич.** Зам. Председателя ФГБНИУ СОПС Минэкономразвития и РАН. Д. э. н., профессор. Окончил в 1981 г. МГУ. Количество печатных работ: более 200 (в т. ч. 10 монографий). Область научных интересов: водное хозяйство, экономика природопользования, экологическая безопасность, программно-целевое планирование. E-mail: avvs@sops.ru