

ГЕОИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ РЕЧНЫХ ВОДОСБОРОВ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

Г. В. Зибров*, В. М. Умывакин**, Д. А. Иванов**, Д. А. Матвиец*, А. В. Швец*

*Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

**Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 5 сентября 2013 г.

Аннотация. В работе рассматриваются квалиметрические модели интегральной оценки экологической опасности территорий бассейновых геосистем и их применение для измерения общей эрозионной опасности земель речных водосборов Воронежской области.

Ключевые слова: устойчивое природопользование, речной водосбор (бассейновая геосистема), интегральная оценка экологической опасности территорий, геоинформационно-аналитические технологии.

Abstract. In article qualimetric models of an integrated assessment of ecological danger of territories of basin 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 environmental management, river reservoir (basin geosystem), integrated assessment of ecological danger of territories, geoinformation and analytical technologies

Введение

Для управления устойчивым (сбалансированным эколого-экономическим) природопользованием в регионе на основе геосистемно-бассейнового подхода необходимо использовать интегральные оценки качества территорий речных водосборов с интенсивным антропогенным воздействием в категориях экологической безопасности (опасности) [1-2].

Понятие «безопасность» не существует без антонима «опасность». В работе [3, 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 территорий речных водосборов (бассейновых геосистем) нами понимается вероятность (возможность) потери качества окружающей среды в результате неконтролируемой антропогенной деятельности.

Квалиметрический подход к оценке экологической опасности территорий бассейновых геосистем

В геоэкологических исследованиях для интегральной оценки качества территорий геосистем, как правило, используются следующие «сводные» формулы (обобщенные критерии, индексы) типа средневзвешенных величин (таблица 1): аддитивная (средневзвешенная арифметическая) и мультипликативная (средневзвешенная геометрическая) [4-6].

Аддитивные интегральные оценки (типа средневзвешенных арифметических), а также мультипликативные (типа средних геометрических) не удовлетворяют существенному свойству «ограниченной компенсации», т.е. условию невозможности улучшения значений некоторых частных оценок

© Зибров Г. В., Умывакин В. М., Иванов Д. А., Матвиец Д. А., Швец А. В., 2013

за счет компенсации сколь угодно большого снижения качества по другим частным оценкам.

Таблица 1
Виды средневзвешенных величин
(интегральных оценок качества территорий геосистем)

Вид среднего взвешенного	Формула
арифметическое	$d_m = \sum_{j=1}^m \lambda_j d_j$
геометрическое	$d_g = \prod_{j=1}^m d_j^{\lambda_j}$
квазигеометрическое	$d = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j)^{\lambda_j}$

Примечание: через d_j обозначена j -я частная относительная оценка некачественности (экологической опасности) территорий геосистем по j -му частному показателю качества; λ_j – весовые коэффициенты.

Рассмотрим методическое обеспечение неаддитивной (нелинейной) интегральной оценки экологической опасности территорий бассейновых геосистем. Сформулируем следующий набор содержательных требований к интегральной оценке экологической опасности территорий бассейновых геосистем: данная оценка должна представлять собой некоторую «сводную» формулу, в которой «объединены» частные относительные оценки экологической опасности по отдельным показателям качества территорий; методики построения частных оценок должны входить составной частью в методику расчета интегральной оценки; частные оценки и интегральная оценка качества/некачественности территорий должны допускать вероятностную интерпретацию.

Предположим, что интегральное качество территорий бассейновых геосистем характеризуется фиксированным перечнем (набором) частных показателей качества (ПК) y_1, y_2, \dots, y_m . В дальнейшем предполагается, что чем меньше значение ПК, тем выше качество территорий. Требуется построить интегральную оценку качества территорий, которая обладает определенными содержательными свойствами [6] и удовлетворяет определенным формальным априорным требованиям (аксиомам) [7].

Для построения интегральной оценки экологической опасности территорий бассейновых геосистем (например, обобщенной оценки эрозионной деградации земель речных водосборов), нужно иметь относительные частные оценки по частному

ПК. Обозначим через y_j^i – значение j -го ПК территории i -й геосистемы, а через y_j^* – предельно-допустимое значение j -го ПК (нормативное экологическое требование) для всех анализируемых речных водосборов. Поставим им в соответствие две безразмерные величины: $M_j^i = M_j(y_j^i)$ – абсолютную оценку качества по j -му ПК территории для i -й геосистемы и $E_j = E_j(y_j^*)$ – соответствующий нормативный уровень. Будем считать, что $0 \leq M_j^i, E_j \leq 1$, ($j=1, 2, \dots, m$; $i=1, 2, \dots, N$). Например, в работе [8] используются функции «желательности» вида:

$$M_j = \exp[-\exp(-z_j)],$$

$$E_j = \exp[-\exp(-z_j^*)]. \quad (1)$$

Нормативное требование к качеству территорий по j -му ПК территории для i -й геосистемы выполнено, если $M_j^i \geq E_j$. При этом частная относительная оценка d_j^i экологической опасности территории i -й геосистемы 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 территорий); 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 [7] показано, что при $M_j^i \geq E_j$ условиям 1)-4) удовлетворяет частная оценка экологической опасности территорий геосистем 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 интегральной оценке качества территорий i -й геосистемы не выполняется при выполнении требований к качеству ее территории по j -му частному ПК.

Интегральная оценка экологической опасности территорий бассейновых геосистем имеет вид [1,7]:

$$d^i = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - d_j^i]^{\lambda_j}, \quad (3)$$

где λ_j – весовые коэффициенты частных оценок d_j^i , удовлетворяющие условию

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

Данная оценка является средневзвешенной «квазигеометрической» величиной [9] (см. таблицу 1) и имеет место неравенство:

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

Таким образом, средневзвешенное квазигеометрическое является оценкой сверху для средневзвешенного арифметического и средневзвешенного геометрического. При этом $0 \leq d \leq 1$. Чем меньше ее значение, тем ниже уровень экологической опасности (тем выше качество территории речного водосбора). Можно показать [7], что данная оценка также имеет вероятностную интерпретацию.

Частные относительные оценки d_j в зависимости от вклада в формирование интегральной оценки d экологической опасности территорий разделяются на две группы:

а) необходимые частные оценки, минимальные (нулевые) значения каждой из которых необходимы для обеспечения минимального (нулевого) значения интегральной оценки, а если хотя бы одна из них имеет максимальное значение (равна единице), то интегральная оценка также принимает максимальное значение (равна единице);

б) достаточные частные оценки, минимальное (нулевое) значение хотя бы одной из которых достаточно для обеспечения минимального (нулевого) значения интегральной оценки, а при значении любой из них, равном единице, не влияет на интегральную оценку.

Первой группе соответствует интегральный критерий типа средневзвешенного квазигеометрического, а второй – средневзвешенного геометрического. Таким образом, с учетом вышеприведенной классификации частных оценок следует использовать интегральную оценку типа средневзвешенного «гипергеометрического»:

$$d = \left(1 - \prod_{j=1}^{m_1} (1 - d_j)^{\lambda_j} \right) \prod_{j=m_1+1}^m d_j^{\lambda_j},$$

где $j = 1, 2, \dots, m_1$ – индексы частных оценок первой группы; $j = m_1 + 1, m_1 + 2, \dots, m$ – индексы частных оценок второй группы.

Подчеркнем, что только интегральные оценки экологической опасности территорий типа средневзвешенного квазигеометрического (см. таблицу 1) удовлетворяют теореме о хрупкости хорошего [9]. Согласно которой «...для системы, принадлежащей особой части границы устойчивости, при малом изменении параметров более вероятно попадание

в область неустойчивости, чем в область устойчивости. Это проявление общего принципа, согласно которому всё хорошее (например, устойчивость) более хрупко, чем плохое» [9, с. 31–32]. В геоэкологии используется аналогичный принцип лимитирующего фактора.

Для содержательного анализа результатов моделирования интегральной оценки экологической опасности территорий в работах [1–2] предлагается использовать вербально-числовую шкалу Харрингтона [8] (таблица 2).

Таблица 2
Степень экологической опасности территорий по шкале Харрингтона

№ 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

Данная шкала включает содержательное (вербальное) описание выделенных градаций шкалы и соответствующие им числовые значения моделируемого показателя речных водосборов.

Картирование интегральной оценки эрозионной деградации земель речных водосборов Воронежской области

Рассмотрим применение геоинформационно-аналитических технологий интегральной оценки экологической опасности территорий бассейновых геосистем для картирования уровня общей эрозионной деградации земель речных водосборов Воронежской области.

Появившиеся в настоящее время общедоступные цифровой модели рельефа (ЦМР) и средства их обработки с помощью геоинформационных технологий открывают широкие возможности по исследованию бассейновых геосистем. Их границы выделены на основе обработки находящейся в открытом доступе ЦМР в виде матрицы высот SRTM (Shuttle Radar Topographic Mapping) размещенной (http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/). В работе использован набор радарных данных $5^\circ \times 5^\circ$ (6001x6001 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 (9087x3848 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 Spatial Analyst ArcGIS. 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, имеющиеся в исходных данных SRTM. Чаще всего, 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 км². В работе использована полу-

ченная сеть водотоков с кумулятивным стоком более 1000 ячеек, которая, в общем виде, соответствует гидросети топографической карты масштаба 1:200 000;

– *идентификация звеньев водотоков (Stream Link)*. 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 (Stream Order)* производится на основе покрытий звеньев водотоков и направлений стока. Это методика присвоения числового порядка звеньям в сети водотоков в зависимости от числа их притоков.

Для расчета выбрана методика Хортон, 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 (Stream to Feature)*, 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 км², принадлежащих бассейну Дона в границах Воронежской области (рисунок 1). При этом общее число водотоков звеньев составило более 10 600 штук.

В качестве информативных ПК интенсивности развития эрозионной деградации земель на речных водосборах Воронежской области приняты: y_1 – «смытость почв с площади с.-х. угодий, %», y_2 – «густота овражно-балочной сети, км/км²». Значения показателя y_2 определены с помощью ГИС-технологий обработки цифровой модели рельефа исследуемой территории Воронежской области. Значения показателя y_1 также могут быть получены с использованием ГИС-технологий.

На основе интегральной оценки деградации земель речных водосборов Воронежской области,

вычисленной по формулам (1–3), и использования шкалы Харрингтона (см. таблицу 2) построена интегральная карта общей эрозионной деградации земель речных водосборов (см. рисунок 1). На

рисунке 2 дано графическое представление интегральной оценки эрозионной деградации земель речных водосборов.

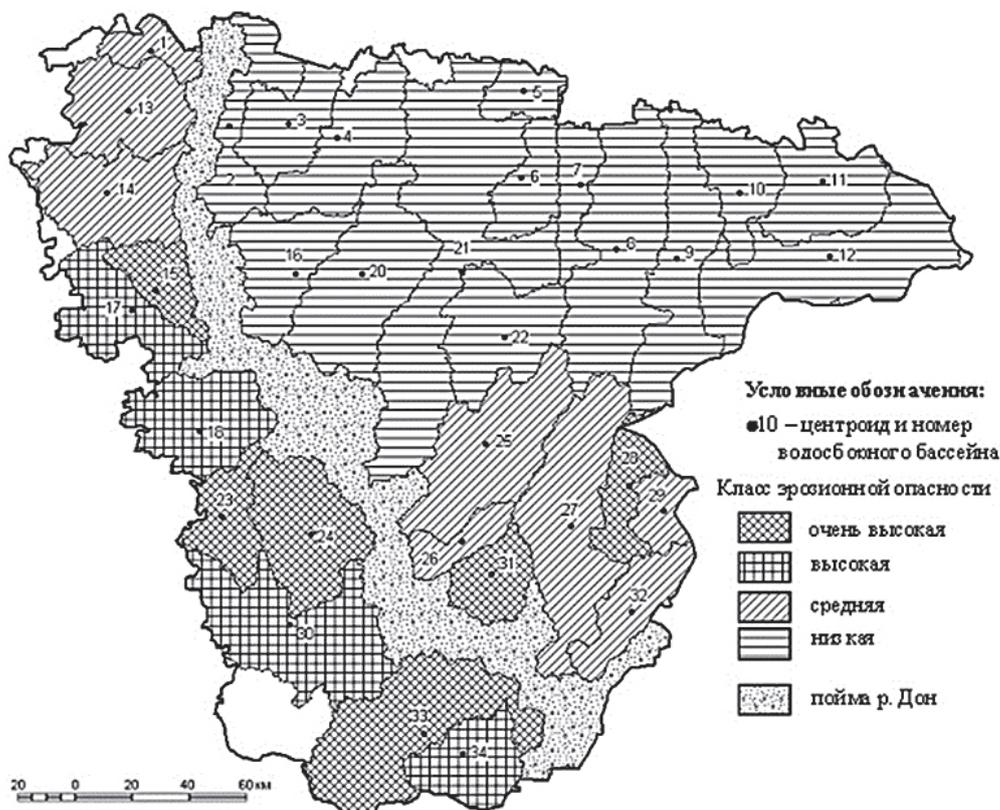


Рис. 1. Интегральная оценочная карта общей эрозионной деградации земель речных водосборов Воронежской области: 1 – Б. Верейка, 2 – Воронеж, 3 – Усмань, 4 – Хава, 5 – Эртиль, 6 – Курлак, 7 – Токай, 8 – Елань, 9 – Савала, 10 – Карачан, 11 – Ворона, 12 – Хопер, 13 – Ведуга, 14 – В. Девица, 15 – Н. Девица, 16 – Хворостань, 17 – Потудань, 18 – Тихая Сосна, 19 – пойма р. Дон, 20 – Икорец, 21 – Битюг, 22 – Чигла, 23 – Ольховатка, 24 – Россошь, 25 – Осередь, 26 – Гаврило, 27 – Толучеевка, 28 – Подгорная, 29 – Манина, 30 – Черная Калитва, 31 – Мамоновка, 32 – Криуша, 33 – Богучар, 34 – Левая Богучарка

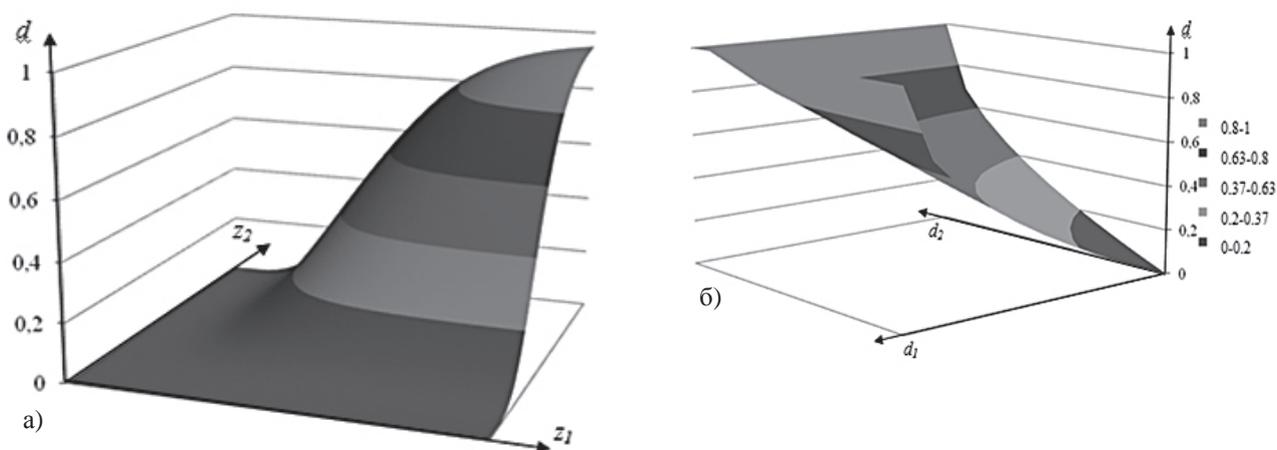


Рис. 2. Визуальное представление интегральной оценки эрозионной деградации земель речных водосборов Воронежской области в шкале Харрингтона: а) z_1 – нормированный показатель y_1 «смытость почв с площади с.-х. угодий»; z_2 – нормированный показатель y_2 «густота овражно-балочной сети»; б) d_1 – частная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

Заключение

В результате проведенного исследования разработан и апробирован на примере Воронежской области научно-методический аппарат квалиметрического подхода к построению неаддитивной интегральной оценки экологической опасности территорий бассейновых геосистем [1, 2, 11]. Методика построения данной оценки характеризуется оригинальным способом формирования нелинейных частных и интегральной оценок, имеющих вероятностный характер, что позволяет квалифицированно измерять и содержательно интерпретировать уровень общей эрозионной деградации земель речных водосборов в универсальной вербально-числовой шкале Харрингтона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зибров Г. В. Геоэкологическая квалиметрия природно-хозяйственных территориальных систем / Г. В. Зибров, В. М. Умывакин, Д. А. Матвиец // Экологические системы и приборы. – 2011. – № 5. – С. 3–9.
2. Умывакин В. М. Геосистемный анализ эрозионно-экологической ситуации на территории речных водосборов для управления устойчивым природопользованием / В. М. Умывакин, А. В. Пахмелкин, Д. А. Иванов // Тр. науч.-исслед. ин-та геологии Воронеж. гос. ун-та. Вып. 67. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2012. – 81 с.
3. Кочуров Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развитие / Б. И. Кочуров. – М. ; Смоленск : Маджента, 2003. – 384 с.
4. Бочаров В. Л. Эколого-математические исследования техногенно-природных геосистем / В. Л. Бочаров,

Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)
Г. В. Зибров, начальник ВУНЦ ВВС «ВВА», доктор педагогических наук, профессор
Тел. 8 (473) 226-46-67 (301)

Воронежский государственный университет
В. М. Умывакин, профессор, доктор географических наук
Тел. 8 (473) 220-82-82
umyvakin@mail.ru

Д. А. Иванов, кандидат геолого-минералогических наук, доцент
Тел. 8 (473) 220-86-31
ivanov@geol.vsu.ru

В. И. Кашников, Л. Н. Строгонова // Тр. науч.-исслед. ин-та геологии Воронеж. гос. ун-та. Вып. 46. – Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2007. – 115 с.

5. Дмитриев В. В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы / В. В. Дмитриев // Общество. Среда. Развитие. – 2009. – № 4. – С. 146–165.

6. Музалевский А. А. Комплексная оценка (гео)экологической обстановки в крупных городах и промышленных зонах / А. А. Музалевский, Е. А. Яйли // Учен. записки. Рос. гос. гидрометеор. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 104–114.

7. Умывакин В. М. Интегральная эколого-хозяйственная оценка и управление земельными ресурсами в регионе / В. М. Умывакин. – Воронеж : Воронеж. гос. пед. ун-т, 2002. – 178 с.

8. Harrington E. C. Jr. The desirability function / E. C. Jr. Harrington // Industrial quality control. – 1965. – Vol. 21, № 10. – P. 494–498.

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

10. Арнольд В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. – М. : Наука, 1990. – 128 с.

11. Зибров Г. В. Квалиметрический анализ геоэкологической опасности территорий с интенсивной антропогенной деятельностью / Г. В. Зибров [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия : Геология. – 2009. – № 2. – С. 180–186.

Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (Voronezh)
G. V. Zibrov, a chief, Doctor of the Pedagogical Sciences, Professor
Тел. 8 (473) 226-46-67 (301)

Voronezh State University
V. M. Umyvakin, a Professor, Doctor of the Geographical Sciences
Тел. 8 (473) 220-82-82
umyvakin@mail.ru

D. A. Ivanov, an assistant professor, Candidate of Geology-Mineral Sciences
Тел. 8 (473) 220-86-31
ivanov@geol.vsu.ru

Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Д. А. Матвиец, преподаватель

Тел. 8 (903) 650-21-14

dmatviiec@mail.ru

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

D. A. Matviets, a lecturer

Tel. 8 (903) 650-21-14

dmatviiec@mail.ru

А. В. Швеиц, младший научный сотрудник

Тел. 8 (950) 765-65-65

shvets-av@mail.ru

A. V. Shvets, a younger scientific employer

Tel. 8 (950) 765-65-65

shvets-av@mail.ru