



УДК 504.064:502.005

## О ЕДИНОЙ МЕТРИКЕ КОМПЛЕКСНОГО ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

О.В. Базарский, И.И. Косинова\*

*Воронежский военный инженерный авиационный институт*

*\*Воронежский государственный университет*

Вводятся основные параметры комплексного эколого-геологического пространства. Основой интегрального моделирования предлагается считать экологический квант действия, определяющий минимально действующую величину концентрации токсиканта. Разработана математическая модель, позволяющая дать интегральную оценку состояния эколого-геологических систем природного и техногенного происхождения.

XX век стал рубежом в истории развития человечества. Скачкообразное развитие научно-технического прогресса на планете способствовало формированию ноосферы как сферы разумной деятельности человека. Он становится мощной геологической силой, которая по своим масштабам соответствует крупнейшим геологическим процессам. В работе В.И. Вернадского, создавшего учение о ноосфере, отмечается, что человек «может и должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни, перестраивать коренным образом по сравнению с тем, что было раньше» [1]. Однако буквальное понимание своих «неограниченных» возможностей переориентировало человечество в сторону экологического тупика. Техносфера, выстроенная в XX веке, явилась надстроенным образованием относительно природных систем. Ее вторжение в планету имело деструктивный характер. В результате увеличилась скорость протекания процессов в различных звеньях круговорота в 10-20 раз, что может привести к глобальным эффектам.

Таким образом, на рубеже тысячелетий перед человечеством встал жесткий техногенно-экологический императив, предполагающий, что любая инженерная деятельность должна соотноситься с законами природы. В учении о ноосфере заложены основные принципы существования человека и природы, предполагающие создание нового конгломерата природно-технических систем, элементы которых не уничтожают, а гармонично дополняют друг друга [2]. Эколого-геологические системы (ЭГС) включают три взаимодействующие компоненты: приповерхностная часть литосферы, биота и техносфера. С точки зрения вещественных и энер-

гетических процессов эти системы можно рассматривать в виде двух составляющих – физико-химической и биологической. Между ними существуют множество прямых и обратных связей, обеспечивающих стабильное функционирование ЭГС. Эти составляющие отличаются уровнем своей организации. В физико-химической составляющей наблюдаются вещественные и энергетические взаимодействия, в результате самопроизвольные изменения в системе идут только с образованием ее более устойчивого состояния с минимумом потенциальной энергии.

Биологическая составляющая *обладает памятью*, в ней, помимо обозначенных, осуществляются энергоинформационные взаимодействия. В результате ее усложнение (уменьшение энтропии) может осуществляться за счет использования информации. Физико-химическая составляющая имеет конечный потенциал развития, в то время как биологическая эволюционирует в пространстве и времени.

В целом эволюция любого разумного биологического вида может происходить как минимум по двум направлениям. Первое предполагает совершенствование собственных возможностей. В частности, человеческий организм обладает мощнейшим энергетическим и информационным потенциалом. Умение управлять физиологическими и регенеративными процессами в собственном организме, использование всего объема головного мозга (который сейчас функционирует на 5-7%), способность аккумулировать энергию не столько грубых, но более тонких природных источников позволило бы человеку достойно существовать на своей планете, не разрушая ее. Второй путь предполагает развития че-

ловечества на основе создания мощной техноструктуры. Большую долю в ней имеют вещества-ксенобиотики, чуждые для природы химические соединения. Человечество, потребляя высокоорганизованную энергию и различные вещества естественного и природного происхождения, обеспечивает собственное существование и накопление информации, ускоряющей деградацию окружающей среды. Однако такой путь развития системы имеет ограниченные пределы роста и конечен даже в исторически обозримом промежутке времени.

Отметим, что процесс редукации системы не должен быть обратимым. Это принципиально невозможно в информационно развивающейся системе. Просто на каждом витке развития необходимо устанавливать параметры состояния эколого-геологических систем, приемлемые для существования и развития человечества, платой за которые будет ограничение и оптимизация темпов роста.

Важным этапом обеспечения синергетического состояния системы является выработка единых критериев оценок физико-химической составляющей ЭГС в условиях современного многокомпонентного технологического воздействия на нее. Физико-химическую составляющую можно представить в виде трех сред:

– минеральная: горные породы, почвы, донные отложения.

– газообразная компонента горных пород и почв, а также приповерхностный слой атмосферы.

– жидкая, представленная подземными и поверхностными водами.

Такое деление целесообразно, так как, во первых, соответствует различным фазам состояния вещества, которые имеют различные физико-химические свойства; во вторых, в этих средах специфически осуществляются процессы рассеяния и накопления токсикантов. Эти обстоятельства привели к тому, что методы экологических оценок техногенного воздействия в этих средах значительно различаются. Данное обстоятельство является основным противоречием при создании интегральных моделей сложных эколого-геологических систем.

Нами предлагается общий методологический подход разработки интегральных моделей ЭГС, который основан на единой метрике комплексного эколого-геологического пространства.

## Экологические понятия, используемые в модели

1. **Концентрация токсикантов**  $C_i$ .  $C_i$  – средняя концентрация токсиканта в  $i$ -й пробе, усредненная не менее чем по трем измерениям. Поскольку в различных средах и для различных веществ единицы измерения различаются, то в модели используются нормированные безмерные значения концентрации.

2. **Предельно допустимая концентрация токсикантов (ПДК)**. Под ПДК понимается минимально возможная концентрация токсикантов, которая начинает

неблагоприятно воздействовать на организм человека, вызывая неприятные ощущения, но не вызывая патологических изменений или заболеваний в течение жизни человека. Здесь и в дальнейшем под ПДК понимаем его осредненное значение.

### 3. Коэффициент концентрации ПДК.

$$K_i = \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} - \text{безразмерная концентрация токсикантов}$$

в  $i$ -й пробе для любой среды.

4. **Экологический квант действия (ЭКД)**. Это вновь вводимое понятие. Для определения ПДК устанавливается минимально действующая величина концентрации токсиканта – собственно ПДК и максимально недействующая. Измерения их экологического воздействия в различных средах показали, что отношение этих величин колеблется в пределах от 10 до 20 [3, 4]. В качестве универсального отношения для всех сред возьмем 16, (это т.н. средняя величина, которая также позволяет перейти к логарифмической шкале измерений). Необходимость этого перехода обусловлена тем, что биоотклик на внешнее воздействие происходит по логарифмическому закону, что обеспечивает устойчивость жизнедеятельности.

Таким образом, максимально недействующее значение токсиканта универсальное для всех сред  $\epsilon_i = \frac{\text{ПДК}_i}{16}$ . Полученную величину предлагается именовать *экологическим квантом действия токсиканта*. ЭКД количественно определяет величину максимально недействующих на организмы концентраций токсических веществ. Накопление квантов производит неблагоприятные изменения в организме. Концентрации элементов в пределах меньших экологического кванта не накапливаются, так как организм выводит токсиканты полностью без изменения своего состояния. Каждое кратное значение ПДК максимально содержит 16 квантов. Соответственно должен выбираться шаг измерений, причем точность измерений метода или прибора  $-\Delta \leq 1$ . Данный подход позволяет перейти от непрерывной к дискретной модели ЭГС. 16 градаций ПДК можно связать с классами опасности токсикантов. Один экологический квант соответствует нулевому классу опасности, то есть  $2^0=1$ . Два экологических кванта соответствуют максимальному первому классу опасности, то есть  $2^1=2$ , когда они уже начинают неблагоприятно воздействовать на организм. В этом случае минимально возможное число квантов, дающих ПДК, равно 2. Четыре экологических кванта соответствуют второму классу опасности, то есть  $2^2=4$ . Восемь экологических квантов соответствуют третьему классу опасности, то есть  $2^3=8$ , и шестнадцать квантов – четвертому, то есть  $2^4=16$ . Следовательно, чтобы возникло экологическое воздействие на организм, необходимо 16 квантов токсиканта 4-го класса опасности, восемь – 3-го класса, четыре – 2-го класса и два самого опасного первого класса.

Таким образом, создание интегральной модели ЭГС, на которую воздействуют токсиканты различных классов опасности, опирается на число квантов, определяющих область существования ПДК. Оно равно  $2^m$ , где  $0 \leq m \leq 4$  – класс опасности токсиканта.

**5. Суммарный показатель техногенной нагрузки  $Z_k$ .**

Коэффициент концентрации токсикантов, который определяется как отношение средней концентрации в пробе к фоновой концентрации, рассчитывается по формуле [2]:

$$K_c = C_i / C_{cp}$$

Однако этот коэффициент не универсален, так как при выборе различных значений фона он не является инвариантом.

Инвариантом является суммарный показатель техногенной нагрузки  $Z_k$  или (СПК).

$$Z_k = \sum_{i=1}^n K_i - (n-1),$$

где  $n$  – число токсикантов.

**6. Экологические ранги.** В соответствии с [5]

принята четырехранговая шкала техногенной нагрузки. Это объясняется следующими причинами. Задача классификации экосистемы сводится к отнесению ее к одному из  $N$  выбранных рангов. В [5] показано, что вероятность принятия правильного решения определяется следующим выражением:

$$P = \frac{1}{N^{(1-I_1/I_2)^2}},$$

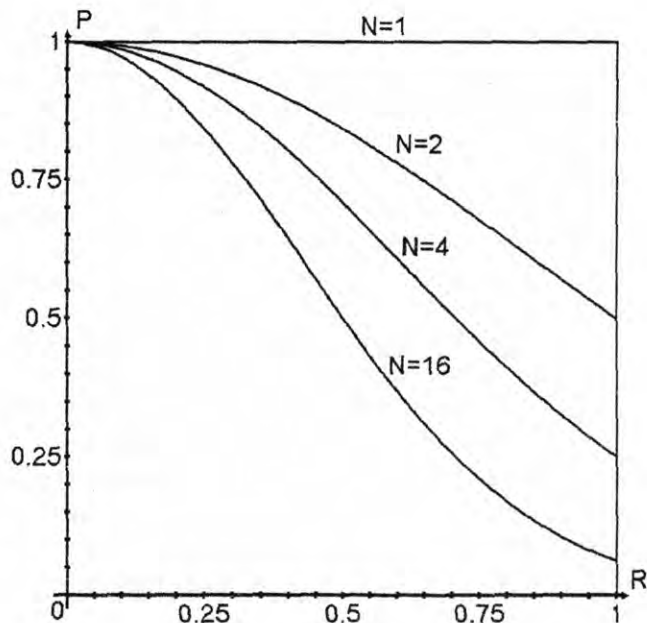
где  $I_1$  – информационная емкость измерений, полученных при экспериментальном изучении анализируемого объекта,  $I_2$  – информационная емкость эталонной базы данных.

Если  $I_1 = 0$ , то есть информация о системе полностью отсутствует, то  $P = 1/N$  и вероятность правильной классификации равна вероятности случайного угадывания. Тот же случай наблюдается при  $I_2 \ll I_1$ , когда текущая информация не соответствует эталонной базе данных. И наоборот, когда  $I_1 = I_2$   $P = 1$  – это случай распознавания детерминистской системы с малыми ошибками измерений. То есть необходимо согласовывать измерения с эталонной базой данных, на основе которой по тем или иным решающим правилам принимается решение о отнесении объекта к некоторому рангу (классу) из эталонного набора.

При отсутствии априорной информации все ранги равновероятны. Тогда информационная емкость измерений  $I = n \log_2 N$ . Следовательно,  $P = 1/N^{R^2}$ .

Здесь  $(1 - \frac{n_1 \log_2 N_1}{n_2 \log_2 N_2}) = R$ ,

где  $R$  – информационная неопределенность результатов измерений относительно эталона. На рис. 1 приведены зависимости вероятности правильной классификации в зависимости от неопределенности информации для различного числа эталонных рангов  $N$ . (Вероятность правильной классификации экологической ситуации в зависимости от неопределенности измерений и количества рангов). Видно, что для  $N=2$  вероятность правильной классификации наиболее высока при  $R > 0,5$ . Однако это достаточно грубая классификация, и результат значительно ухудшается при отсутствии в полученных измерениях хотя бы одного токсиканта.



**Рис. 1. Вероятность правильной классификации экологической ситуации в зависимости от неопределенности измерений и количества рангов**

Рассогласование по информационной емкости сказывается меньше для большего числа токсикантов  $n$  и в гораздо меньшей степени для числа рангов  $N$ . Поэтому оптимальной является *четырёхранговая шкала с числом токсикантов не менее пяти*. Например, если в этом случае в измеренных данных отсутствует один токсикант из пяти эталонных, то вероятность правильной классификации по четырехранговой шкале  $P = (1/4)^{0,04} = 0,95$ , то есть достаточно высокая. Математическое обоснование четырех рангов оценки эколого-геологических систем подтверждает оптимальность шкалы оценок состояний, предложенных В.Т. Трофимовым, и др.

**7. Единая метрика эколого-геологического пространства.**

Универсальная единица измерения – коэффициент концентрации по ПДК –  $K_i$ . Интегральная характеристика загрязнения – суммарный показатель техногенной нагрузки  $Z_k$ .

Число рангов оценок  $N=4$ . Первый ранг – экологическая норма, при которой величина каждого токсиканта меньше или равна ПДК. Тогда максимальное значение  $K_i$ , определяющее порог нормы и границу первого ранга для одного токсиканта,  $K_i=1$ , то есть  $0 < Z_{k1} \leq 1$ , независимо от числа токсикантов. Здесь максимально содержится шестнадцать экологических квантов. Второй ранг – экологический риск, когда возможен обратимый процесс восстановления экологической системы при прекращении техногенной нагрузки. Для одного токсиканта максимальное  $K_i=2$ , то есть граница риска для каждого токсиканта равна 2ПДК. Здесь также содержится шестнадцать квантов. Соответственно область определения  $1 < Z_{k2} \leq n+1$ , где  $n$  – число токсикантов. Третий ранг – экологический кри-

зис, максимально содержащий 96 квантов. Его верхняя граница определяется на уровне 8ПДК для каждого токсиканта. Соответственно область определения  $n+1 < Z_{k3} \leq 7n+1$ . Отметим, что это очень широкий ранг, характеризующийся труднообратимыми последствиями. Поэтому его можно разделить на два подранга. Подранг 3.1 соответствует *компенсируемому кризису*, когда экосистема необратимо изменена, но параметры ее состояния обеспечивают удовлетворительные условия проживания человека. Здесь максимально содержатся 32 экологических кванта, а область определения  $n+1 < Z_{k31} \leq 3n+1$ , при максимальном значении токсикантов  $K_i=4$ . Подранг 3.2 соответствует *некомпенсируемому кризису*, когда экосистема необратимо деградирует, но условия проживания человека еще допустимые. В этом случае  $K_i=8$ , а область определения  $3n+1 < Z_{k32} \leq 7n+1$  включает в себя 64 кванта действия. Четвертый ранг – экологическое бедствие, когда необратимые изменения экосистемы приводят к недопустимым условиям проживания человека. В этом случае  $Z_{k4} > 7n+1$ , а суммарное количество экологических квантов больше 128.

Отметим, что для сохранения единой метрики экологического пространства необходимо для каждой среды фиксировать постоянное число рангов  $N$  и количество токсикантов  $p$ . Токсиканты целесообразно выбирать по одному классу экологической опасности – первому. Если выбираются токсиканты различных классов, то необходимо учитывать их экологический вес. Очевидно, что для различных эколого-геологических районов эти токсиканты могут быть различными, что необходимо учитывать в эталонной базе данных.

Трехмерная метрика экологического пространства приведена на рис. 2, где по каждой оси отложены суммарные показатели техногенной нагрузки  $Z_k$  для твердой, жидкой и газообразной сред, а также значения ПДК (Эталонное комплексное экологическое пространство).

Границы экологических рангов зависят от числа выбранных токсикантов  $p$  и показаны в скобках, а между ними указано число экологических квантов в каждом ранге. Номера рангов и подрангов обведены кружком. Вверху показаны значения ПДК, соответствующие границам рангов.

Следует отметить, что экологическое влияние каждой из сред на организм человека различно, и их сравнительное воздействие мало изучено. Изучена связь заболеваемости населения с различными экологическими признаками для всех трех сред. Максимально негативное воздействие оказывает атмосфера, весовой коэффициент экологического действия который можно принять за единицу. Средний весовой коэффициент водной среды составляет 0,25, а твердой 0,125. Тогда по токсикантам 1 класса опасности ПДК включают: для твердой среды 16 экологических квантов, для жидкой 4 кванта и для газообразной 2 кванта. Такие соотношения квантов связаны со скоростью миграции и усвоения организмом токсикантов в различных средах. Наиболее динамична атмосфера, и ее загрязнение чрез-

вычайно опасно. В твердой среде скорость миграции невысока и токсиканты воздействуют в основном через пищевые цепи. Этот процесс инерционен, и поэтому эквивалентом одного экологического кванта в атмосфере являются восемь в почве. Следовательно первый ранг, ограниченный ПДК, включает в себя 16 квантов в твердой среде, 4 в жидкой и 2 в газообразной. Соответственно во втором ранге также 16,4,2. В подрангах 3.1 и 3.2 соответственно 48,12 и 6 квантов.

В целом экологическая координата для твердой среды содержит 128 квантов, жидкая 32, а газообразная 16. Комплексно при таком ранжировании по токсикантам одинакового класса опасности эти среды должны производить равнозначное экологическое воздействие на организм человека [7].

### Интегральная модель комплексного состояния трехмерной эколого-геологической системы и решающее правило

Рис. 2 является трехмерной комплексной эталонной моделью эколого-геологической системы, где по каждой координате проведено четырехуровневое ранжирование интегрального показателя загрязнения по ПДК и экологическим квантам для  $p$  токсикантов первого класса опасности в каждой среде ( $n \geq 5$ ).

Величина комплексного загрязнения по трем средам характеризуется индекс вектором

$$r_3 = \sqrt{Z_{kr}^2 + Z_{km}^2 + Z_{kr}^2}.$$

Он вычисляется по результатам экспериментальных измерений и сравнивается с пороговым эталонным индекс-вектором для каждого ранга. Для первого ранга  $Z_{1n} = \sqrt{3}$ , как по  $Z_k$ , так и ПДК. Для второго ранга  $Z_{2n} = (n+1)\sqrt{3}$  для  $Z_k$  и  $2\sqrt{3}$  для ПДК. Для подранга 3.1  $Z_{31n} = (3n+1)\sqrt{3}$ , а для ПДК равен  $4\sqrt{3}$ . Для подранга 3.2  $Z_{32n} = (7n+1)\sqrt{3}$ , а для ПДК равно  $8\sqrt{3}$ .

Если  $r_3 \leq \sqrt{3}$ , то принимается решение об экологической норме. Если  $\sqrt{3} < r_3 \leq (n+1)\sqrt{3}$ , то принимается решение об экологическом риске. Если  $(n+1)\sqrt{3} < r_3 \leq (3n+1)\sqrt{3}$ , то принимается решение о компенсируемом экологическом кризисе. Если  $(3n+1)\sqrt{3} < r_3 \leq (7n+1)\sqrt{3}$ , то принимается решение о не компенсируемом кризисе. И если  $r_3 > (7n+1)\sqrt{3}$ , то принимается решение об экологическом бедствии.

Вероятность принятия правильного решения по полученным экспериментальным данным, которые имеют стандартную ошибку определения индекс-вектора  $\sigma_r$ , можно записать следующим образом:

$$P_3 = \Phi\left(\frac{r_3}{\sigma_r}\right), \text{ где } \Phi - \text{интеграл вероятности.}$$

Следует уточнить, что для малых значений экологических квантов в ранге нормы значения  $Z_k$  могут быть отрицательными. Для этих редких случаев, чтобы не нарушать метрику экологического пространства, отрицательные значения  $Z_k$  принимаются равными нулю.

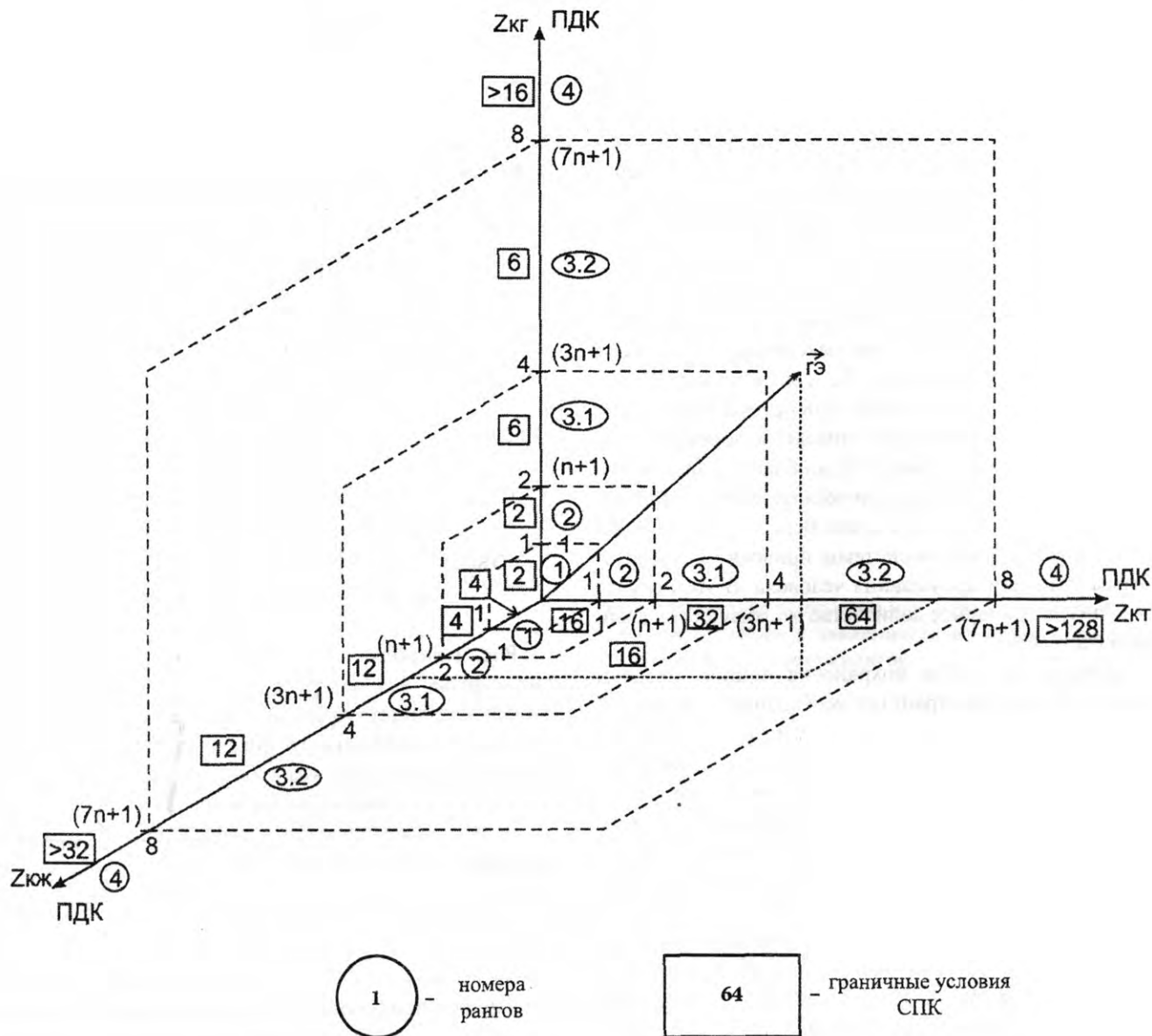


Рис. 2. Эталонное комплексное экологическое пространство

Условные обозначения:

1 – номер ранга; 16 – количество экологических квантов действия; n – число токсикантов

Предлагаемая методика создания интегральных моделей эколого-геологических систем является логическим развитием существующих подходов, учитывает современный опыт в данной области, позволяет перейти на новый качественный уровень оценки эколого-геологических условий как природных, так и техногенно нагруженных территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский, В.И. Биосфера и ноосфера / В.И. Вернадский. – М.: Наука, 1988. – 520 с.  
 2. Косинова, И.И. Методы эколого-геохимических, эколого-геофизических исследований и рационального недропользования / И.И. Косинова, В.А. Богословский, В.А. Бударина. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2004. – 281 с.

3. Гальперин, А.М. Техногенные массивы и охрана окружающей среды / А.М. Гальперин, В. Ферстер, Х.-Ю. Шеф. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 534 с.  
 4. Трофимов, В.Т. Критерий устойчивости как основа построения оценочно-прогнозных карт / В.Т. Трофимов, Н.С. Красилова // Новые идеи в инженерной геологии: тр. науч. конф., 17-18 сент. 1996. – М., 1996. – С. 85-86.  
 5. Базарский, О.В. Информационный подход к классификации и распознаванию пространственно-временных сигналов / Теория и техника взаимосвязи. – Воронеж: ВНИИС, № 1. – 2005. – С.7-13  
 6. Теория и методология экологической геологии / под ред. В.Т. Трофимова. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 368 с.  
 7. Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почве / Санитарные нормы СанПиН 42-128-4433-87. 30 октября 1987 г. № 4433-87.