

УДК 502/504:624

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-119-128

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСОБЕННОСТЕЙ АБИОТИЧЕСКИХ СРЕД ЭКОСИСТЕМ — ЛИТОСФЕРЫ, ПЕДОСФЕРЫ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Виктор Титович Трофимов<sup>1</sup>, Владимир Александрович Королев<sup>2</sup>✉, Марина Анатольевна Харьковина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; trofimov@rector.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия; va-korolev@bk.ru✉

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия; kharkina@mail.ru

**Аннотация.** На основе статистических данных по составу работ для изучения абиотических сфер Земли (литосферы, педосферы, атмосферы и поверхностной гидросферы) в составе инженерно-экологических изысканий показаны разработки современной нормативно-технической базы для оценки количественных показателей состояния экосистем. Описаны достижения современной нормативно-технической базы в плане регламентации показателей состояния абиотических сфер экосистем. Намечены пути дальнейшего ее совершенствования на основе использования учения об экологических функциях как фундаментальной интегральной характеристики особенностей абиотических сред экосистем и систематики частных показателей путем введения четырех категорий интегральных показателей (ресурсных, геохимических, геофизических и геодинамических). Обращено внимание на необходимость разработки интегральных показателей всех абиотических сред экосистем на основе разработок, предложенных в экологической геологии. Рассмотрены различные подходы для оценки таких интегральных показателей и предложен вариант их определения на основе метода сводных показателей.

**Ключевые слова:** экологические функции абиотических сред, ресурсные параметры, геохимические параметры, геофизические параметры, геодинамические параметры, классификация, интегральные показатели, методы определения показателей

**Для цитирования:** Трофимов В.Т., Королев В.А., Харьковина М.А. Экологические функции как фундаментальные интегральные характеристики особенностей абиотических сред экосистем — литосферы, педосферы, атмосферы и гидросферы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 119–128.

## ECOLOGICAL FUNCTIONS AS A FUNDAMENTAL INTEGRAL CHARACTERISTICS OF PECULIARITIES OF ABIOTIC ENVIRONMENTS OF ECOSYSTEM — LITHOSPHERE, PEDOSPHERE, ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE

Viktor T. Trofimov<sup>1</sup>, Vladimir A. Korolev<sup>2</sup>✉, Marina A. Kharkina<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; trofimov@rector.msu.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; va-korolev@bk.ru✉

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kharkina@mail.ru

**Abstract.** The achievements of present regulatory and technical base for assessing quantitative indicators of ecosystems state are shown relying on the statistics of types of jobs for studying the abiotic spheres of the Earth (lithosphere, pedosphere, atmosphere and surface hydrosphere) as a part of engineering-ecological survey. Those achievements regarding to the regulation of indicators of state of abiotic spheres of ecosystem are described. Ways for further improvement of regulatory and technical base have been outlined using the doctrine of ecological functions of the lithosphere as a fundamental integral characteristic of abiotic spheres of ecosystems and the systematization of individual indicators by introducing of four categories of integral indicators (resource, geochemical, geophysical and geodynamic). Attention is drawn to the need to elaborate the integral indicators of all abiotic spheres of ecosystems basing on development of ecological geology. Various approaches for assessing of such integral indicators are considered. Variant of their determination on the base of summary indicators method is proposed.

**Keywords:** ecological functions of abiotic spheres, resource parameters, geochemical parameters, geophysical parameters, geodynamic parameters, classification, integral indicators, methods for determining indicators

**For citation:** Trofimov V.T., Korolev V.A., Kharkina M.A. Ecological functions as a fundamental integral characteristics of peculiarities of abiotic environments of ecosystem — lithosphere, pedosphere, atmosphere and hydrosphere. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 119–128. (In Russ.).

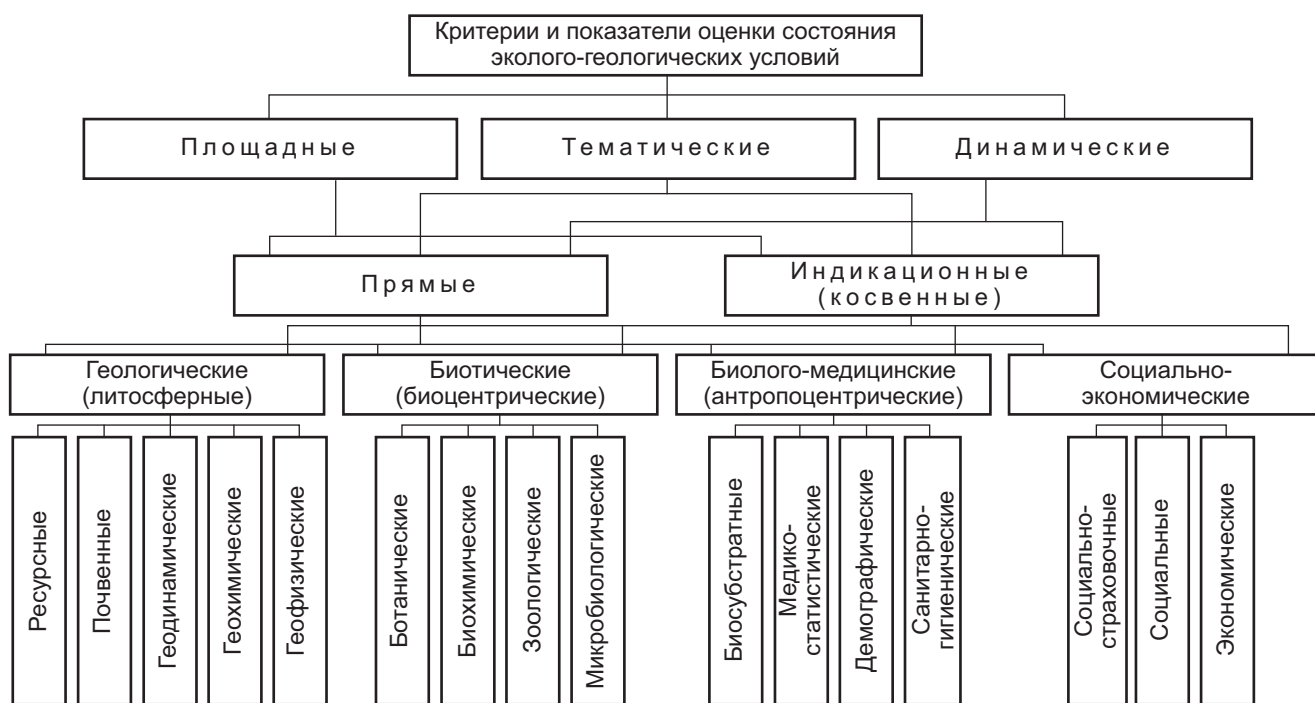


Рис. 1. Систематика показателей, используемых при оценке состояния эколого-геологических условий [Трофимов, 2012]

**Введение.** Важнейшим практическим и теоретическим вопросом современной экологической геологии и геоэкологии является поиск надежных параметров для оценки состояния экосистем. Под *экологической оценкой* [Дмитриев, 2004] понимается параметрическое определение состояний природной среды, обеспечивающих существование сообществ живых организмов, характерных для этих состояний в условиях естественного или антропогенного режимов их развития. Такая оценка сводится к оценке химического, биологического состава и физических свойств природного объекта, обуславливающих устойчивое функционирование в нем конкретных сообществ живых организмов, сохранение определенного типа экологической сукцессии, или к оценке его пригодности для различных видов использования человеком (совмещение био- и антропоцентризма). При этом исследуются как свойства абиотических сред, так и параметры структуры и функционирования биоты — природного объекта в естественных и измененных условиях с целью их рационального использования, обеспечения устойчивости, оптимальной эксплуатации для удовлетворения потребностей людей и жизни организмов [Алимов и др., 1999; Дмитриев, 2004, 2009, 2010; Дмитриев и др., 2014, Королев, 2020].

Для оценки состояния эколого-геологических условий используются различные критерии и показатели. Одна из первых систематик критериев и показателей была дана В.Т. Трофимовым и Д.Г. Зилингом еще в 2002 году (рис. 1) [Трофимов, Зилинг, 2002].

И для прямых, и для индикационных (косвенных) показателей актуальным остается вопрос об их

свертке для нахождения интегральных показателей. Необходимость получения интегральных показателей обусловлена чрезвычайно большим количеством и разнообразием частных показателей состояния экосистем, отражающих какие-либо их отдельные особенности, в то время как интегральные показатели отражают общие особенности экосистем.

Поэтому цель настоящей работы — проанализировать подходы к получению интегральных показателей для оценки состояния экосистем и предложить их оценку на основе экологических функций как фундаментальной интегральной характеристики особенностей абиотических сред экосистем.

**Определение интегральных показателей состояния экосистем.** Разработка различных методик оценки состояния экосистем в настоящее время базируется в основном на индикаторном подходе и индексах состояния систем, их устойчивости, а также — на моделях-классификациях, подавляющее большинство которых построено на балльном или балльно-индексном подходе [Дмитриев и др., 2014]. Положительные стороны и недостатки балльно-индексного подхода не раз обсуждались в литературе [Александрова и др., 2000; Алимов и др., 1999; Дмитриев, 2010; Дмитриев и др., 2014; Дмитриев, Фрумин, 2004; Трофимов, 2012].

Нормативно-техническая база на проведение инженерно-экологических изысканий, которую мы обсуждаем с 1997 г., постоянно улучшается. В ней регламентировано (табл. 1) большое количество пунктов по изучению абиотических сред Земли (литосферы, педосферы, атмосферы и поверхностной гидросферы). К достижениям СП 502.1325800.2021 относятся предложения по использованию цело-

Таблица 1

Статистика по составу работ на изучение абиотических сред экосистем в нормативно-технических документах

Абиотические среды экосистем	Количество пунктов, регламентирующих состав работ инженерно-экологических изысканий в нормативах			
	СП 11-102-97 (регламентируют только инженерно-экологические изыскания)	СП 47.13330.2012 (регламентируют инженерно-геодезические, инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические и инженерно-экологические изыскания)	СП 47.13330.2016	СП 502.1325800.2021 (регламентируют только инженерно-экологические изыскания)
<b>Литосфера</b> и ее компоненты (грунты, донные отложения, подземные воды, подземные газы, ландшафты, геологические процессы, радиационная обстановка, радоноопасность, вибрация, электромагнитные излучения)	82	21	10	163
<b>Педосфера</b> и ее компоненты (почвы, плодородный слой, гумус)	35	7	8	83
<b>Атмосфера</b> и ее компоненты (воздух, электромагнитные излучения, шумы, инфра- и ультразвук, гидрометеорологические процессы)	19	9	9	46
<b>Поверхностная гидросфера</b> и ее компоненты (поверхностные воды суши, морские воды, гидрометеорологические процессы)	17	14	10	52
Все абиотические среды экосистем	153	23	37	344

Примечание. Пункты СП, в которых одновременно регламентировано изучение нескольких абиотических сред экосистем, учитывались несколько раз.

го ряда количественных параметров и критериев оценки абиотических сред экосистем.

Для классификации показателей мы предлагаем в этом нормативно-технический документе разработать и внести общий их перечень с подразделением в соответствии с учением об экологических функциях абиотических сфер Земли [Снакин и др., 1992; Трофимов, 2012; Трофимов, Харькина, 2017а, 2017б; Трофимов и др., 2018] на категории ресурсных, геохимических, геофизических и геодинамических показателей. Напомним, что под экологическими функциями абиотических сред (сфер Земли) понимается все многообразие функций, определяющих и отражающих роль и значение этих геосфер, включая их состав, объем, динамику функционирования, геохимические и геофизические поля, в жизнеобеспечении биоты, в первую очередь человеческого сообщества [Снакин, 1992]. Всего выделено четыре экологических функции — ресурсная, геохимическая, геофизическая и геодинамическая, каждая из которых определяется своими абиотическими параметрами.

В действующем нормативно-техническом документе (СП 502.1325800.2021) среди **параметров литосферы и педосферы, характеризующих ресурсную экологическую функции абиотических сред** указаны только количественные показатели мощности плодородного и потенциально плодород-

ного слоев почв, нормы снятия плодородного слоя (п. 5.20.8, табл. 5.8 свода правил), а также показатель, оценивающий качество подземных вод, как биогенного ресурса — показатель общей минерализации воды (п. 5.13.1 СП 502.1325800.2021). Отметим, что в современном нормативном документе нет ни одного параметра, оценивающего ресурс геологического пространства как экологическую категорию.

Среди **параметров литосферы и педосферы, характеризующих геохимическую экологическую функцию абиотических сред**, определяющих степень загрязнения почв и иных грунтов, донных отложений, снежного покрова, а также подземных вод внесен только суммарный показатель загрязнения тяжелыми металлами и металлоидами различных классов опасности (п. 5.11.14, табл. 5.2 СП 502.1325800.2021). В современных нормативах также предлагается оценка и газогеохимической опасности грунтов с использованием четырехразрядной шкалы (СП 502.1325800.2021 п. 5.18.9). Однако загрязнения иными компонентами — токсичной органикой, патогенной биотой и другими, в этих документах не регламентированы.

К нормативным **параметрам литосферы и педосферы, характеризующим геофизическую экологическую функцию абиотических сред**, согласно СП 502.1325800.2021, относятся в основном параметры техногенных источников различных

Таблица 2

## Корреляционная матрица оценки состояния экосистем

Классы состояния геоэкологических* условий	Параметры абиотических и биотических компонентов								Уровни состояния экосистем
	Абиотические				Биотические				
	Ресурсные	Геодинамические	Геохимические	Геофизические	Антропоцентрические	Биоцентрические			
Ботанические						Зоологические	Микробиологические		
Удовлетворительный	P <sub>1</sub>	ГД <sub>1</sub>	ГХ <sub>1</sub>	ГФ <sub>1</sub>	АЦ <sub>1</sub>	Б <sub>1</sub>	З <sub>1</sub>	МБ <sub>1</sub>	Норма (Н)
Условно удовлетворительный	P <sub>2</sub>	ГД <sub>2</sub>	ГХ <sub>2</sub>	ГФ <sub>2</sub>	АЦ <sub>2</sub>	Б <sub>2</sub>	З <sub>2</sub>	МБ <sub>2</sub>	Риск (Р)
Неудовлетворительный	P <sub>3</sub>	ГД <sub>3</sub>	ГХ <sub>3</sub>	ГФ <sub>3</sub>	АЦ <sub>3</sub>	Б <sub>3</sub>	З <sub>3</sub>	МБ <sub>3</sub>	Кризис (К)
Катастрофический	P <sub>4</sub>	ГД <sub>4</sub>	ГХ <sub>4</sub>	ГФ <sub>4</sub>	АЦ <sub>4</sub>	Б <sub>4</sub>	З <sub>4</sub>	МБ <sub>4</sub>	Бедствие (Б)

*Примечание.* Буквами обозначены значения параметров: Р — ресурсных, ГД — геодинамических, ГХ — геохимических и ГФ — геофизических абиотических сред, АЦ — антропоцентрических, Б — ботанических, З — зоологических, МБ — микробиологических. Цифры в нижнем регистре соответствуют критериям оценки экосистем. \* Под геоэкологическими условиями авторами понимается условия, созданные влиянием всех абиотических сред на условия функционирования биоты.

физических полей: мощность эквивалентной дозы (МЭД) внешнего гамма-излучения, плотность потока радона, эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА радона); удельная эффективная активность естественных радионуклидов (радий (<sup>226</sup>Ra), торий (<sup>232</sup>Th), калий (<sup>40</sup>K) и цезий (<sup>137</sup>Cs)), уровень звукового давления, уровень общей вибрации, напряженность электрического поля, уровень электромагнитного поля, предельно допустимые уровни магнитных полей, допустимые уровни звукового давления, допустимые уровни ультразвука.

**Параметры литосферы, характеризующие геодинамическую экологическую функцию абиотических сред**, и которые используются для оценки интенсивности проявления геологических (оползни, сели, землетрясения, карст, термокарст, термоэрозия и др.), гидрометеорологических (лавины, русловые деформации, наводнения, цунами) и атмосферных (ураганы, смерчи), достаточно подробно описаны для двадцати природных процессов, включая антропогенно обусловленные (переработка берегов водохранилищ, подтопление и др.) в другом действующем нормативно-техническом документе СП 115.13330.2016 «Геофизика опасных природных воздействий». Однако, их оценка дана только в антропоцентрическом аспекте.

Все вышеупомянутые показатели являются *частными*, т.е. описывающими особенность какой-либо одной компоненты экологической функции: либо загрязнение одной из компонент литосферы (например, донных отложений), либо один атмосферный процесс (например, смерчи) и т.п. В существующей нормативно-технической базе инженерно-экологических изысканий не хватает **интегральных показателей**. Напомним, что *интегральная оценка* предполагает наличие этапа, связанного с объединением ранее разнородных

(многокритериальных, частных) оценок в одно целое с учетом их вклада в общую оценку объекта, а *интегральный показатель* отражает комплекс характеристик или параметров, которые описывают данный объект с учетом вклада каждого из факторов формирования данного объекта.

Интегральные параметры оценки экосистем в настоящее время практически не разработаны, частично разработана только структура интегральных критериев. Она, в частности, может быть выражена в виде корреляционной матрицы (табл. 2), в которой каждому классу геоэкологических условий соответствуют свои уровни нарушенности экосистем [Трофимов, Зилинг, 2002], при этом используются и абиотические и биотические параметры состояния экосистем, как это предлагал сделать в своих работах Б.В. Виноградов [1998].

Однако, наряду с этим, есть и иные подходы. В настоящее время предложен ряд методов оценки состояния экосистем на основе разных интегральных показателей.

**А. Метод балльных и балльно-индексных оценок.** Он исторически применялся одним из первых и был основан на экспертной балльной оценке каждого параметра предлагаемой оценочной шкалы состояния экосистемы с учетом весовых коэффициентов для каждого критерия. Наилучшее состояние экосистемы соответствует максимальному (или минимальному в зависимости от параметров) набору суммы всех баллов.

При этом в перечень признаков благополучия экосистемы, по которым подсчитываются баллы, включались, например, такие параметры как: 1 — количество оптимальной первичной продукции, создаваемой в экосистеме; 2 — количество и качество воды; 3 — видовое биоразнообразие; 4 — устойчивость к изменению параметров естест-

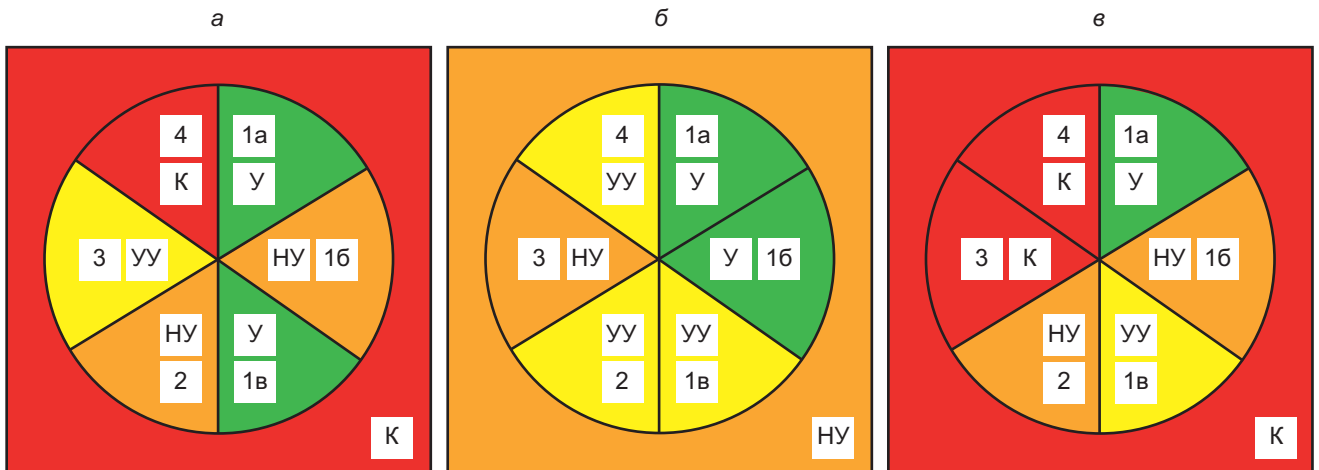


Рис. 2. Типовой вариант интегральной оценки состояния эколого-геологических условий литосферы [Трофимов, Зилинг, 2002]: *а* — интегральная оценка соответствует катастрофическому классу эколого-геологических условий и принимается по состоянию геофизических полей (4), состояние остальных компонентов литосферы более благоприятное и варьирует от класса удовлетворительного состояния (1а, 1в) до класса неудовлетворительного состояния (16, 2); *б* — интегральная оценка соответствует классу неудовлетворительного состояния эколого-геологических условий и принимается по состоянию геохимической обстановки (3), состояние остальных компонентов литосферы варьирует от класса удовлетворительного (1а, 1б) до класса условно удовлетворительного (1а, 2, 4); *в* — интегральная оценка соответствует классу катастрофического состояния эколого-геологических условий и принимается по состоянию геохимических (3) и геофизических (4) полей, состояние остальных компонентов литосферы более благоприятное и варьирует от класса удовлетворительного (1а) до класса неудовлетворительного состояния эколого-геологических условий (16, 2)

венного и антропогенного режимов; 5 — количество биоты (биомасса); 6 — скорость самоочищения и др. [Дмитриев, 2004]. Интегральная оценка получалась по сумме баллов, в том числе с учетом вклада (значимости, «веса») того или иного параметра. При этом вклад оценивался экспертным путем, а потому был часто субъективным.

**Б. Метод оценки проективного покрытия.** Рядом авторов [Караваева, Тихонов, 2022], предлагалось для инженерно-экологических изысканий в качестве интегрального показателя оценки состояния экосистем использовать *степень проективного покрытия фитоценозов*. Этот показатель отражает продуктивность экосистемы, предельно просто определяется в полевых условиях и не требует специализированных компетенций. Считается, что проективное покрытие более 50% характеризует устойчивую экосистему и наоборот.

Однако этот показатель отражает лишь биотическую составляющую экосистемы и то не в полном объеме, так как не учитывает зооценоз.

**В. Метод оценки энергетических параметров экосистемы** представляется весьма перспективным среди интегральных показателей. Он основан, в частности, на количественной оценке энергии, потребляемой данной экосистемой. Однако и здесь этот показатель отражает в большей степени биотическую составляющую экосистемы, ее функционирование, а не роль абиотической составляющей.

Кроме того, экосистема не только потребляет энергию, но и производит ее, а также обменивается энергией с соседними экосистемами и с окружающей средой. Дать всем этим процессам энергообмена интегральную оценку весьма сложно.

**Г. Метод оценки на основе доминанты наилучшего показателя** основан на использовании корреляционной матрицы оценки состояния экосистем (табл. 2).

Для учета всей гаммы экологических свойств абиотических сред экосистем составляется циклограмма с выделением сегментов по числу анализируемых экологических функций и ранжированием на классы состояния по аналогии с оценкой эколого-геологических условий, что было сделано ранее в экологической геологии. Примеры такой оценки приведены на рис. 2 применительно к состоянию литосферы, где показаны классы состояния территорий в соответствии с табл. 2. Подобную оценку можно сделать и для других абиотических сред экосистем, тогда уже необходимо будет использовать термин «классы состояния геоэкологических условий».

По нашему мнению, дальнейшая работа по поиску интегрального показателя состояния экосистем должна быть направлена на использование в качестве теоретической базы учения об экологических функциях абиотических сред, на оценке значимости введенных показателей состояния абиотических сред и на разработку подходов к их интегральной оценке. В рамках этого направления можно использовать метод сводных показателей.

**Д. Метод сводных показателей (МСП).** Этот метод поиска интегрального показателя реализуется в несколько этапов [Дмитриев, 2004, Трофимов и др., 2018]: 1) обоснование системы критериев диагностирования экосистемы; 2) переход к безразмерным показателям (нормирование); 3) выбор вида интегрального показателя  $Q$ ; 4) ввод оценки

Таблица 3

## Критерии оценки особенностей абиотических сред экосистем на основе экологических функций массива грунтов

Критерий	Параметры ( $x_i$ )	Преобразованные (безразмерные) параметры, $q_i$
<b>А. Биоцентрические критерии и параметры экологических функций</b>		
<i>Эколого-ресурсная</i>		
Ресурс геологического пространства	Относительный объем для расселения биоты, $x_1$ , %	$q_1$
Ресурс, качество и доступность воды	Влажность грунта, $x_2$ , %	$q_2$
	Влажность завядания, $x_3$ , %	$q_3$
	Общая минерализация, $x_4$ , г/л	$q_4$
Ресурс питательных веществ для биоты	Запас (отн. масса) питательных веществ, $x_5$ , %	$q_5$
Ресурс почв, как среды обитания почвенной биоты	Мощность почв, $x_6$ , м	$q_6$
	и содержание гумуса, $x_7$ , %	$q_7$
Ресурс грунтов — «строительных» материалов для гнезд биоты	Наличие (отсутствие) используемых грунтов, их мощность, $x_8$ , м	$q_8$
<i>Эколого-геохимическая</i>		
Наличие биофильных элементов	Содержание С, N, P, K, Са в грунтах, $x_{9-13}$ , %	$q_9-q_{13}$
Тип и скорость геохимической миграции веществ	Коэффициенты: фильтрации, $x_{14}$ , м/сут,	$q_{14}$
	диффузии, $x_{15}$ , см <sup>2</sup> /с),	$q_{15}$
	осмоса, $x_{16}$ , см <sup>5</sup> /моль·с и др.	$q_{16}$
Формирование геохимических барьеров разного типа	Тип барьера и его параметры: мощность, $x_{17}$ , м;	$q_{17}$
	сорбционная способность, $x_{18}$ , % и др.	$q_{18}$
Геохимические аномалии	Тип и величина аномалии, $x_{19}$ , %	$q_{19}$
<i>Эколого-геодинамическая</i>		
Влияние процесса на грунтовый массив	Коэффициент относительной пораженности процессом, $x_{20}$ , %; параметры ЭГП по СП 47.13330.2016	$q_{20}$
Парагенез ЭГП как фактор биоразнообразия (как положительное, так и отрицательное влияние)	Влияние процесса на биоразнообразие: число видов/ед. площади, $x_{21}$ ;	$q_{21}$
	индекс разнообразия Шеннона, $x_{22}$	$q_{22}$
<i>Эколого-геофизическая</i>		
Наличие природных аномалий геофизических полей: теплого вибрационного акустического электромагнитного радиационного	Влияние аномалий полей на биоту:	
	Тепловая аномалия, $x_{23}$ , °С	$q_{23}$
	Вибрационная аномалия, $x_{24}$ , МГц	$q_{24}$
	Акустическая аномалия, $x_{25}$ , дБ	$q_{25}$
	Аномалия электромагнитного поля, $x_{26}$ , Н	$q_{26}$
	Аномалия радиационного поля, $x_{27}$ , мкЗв	$q_{27}$
Наличие геопатогенных зон	Отклонения функций у организмов, $x_{28}$ , %	$q_{28}$
<b>Б. Антропоцентрические критерии и параметры экологических функций</b>		
<i>Эколого-ресурсная</i>		
Ресурс горючих полезных ископаемых	Запасы ископаемых, $x_{29}$ , т;	$q_{29}$
	$x_{30}$ , м <sup>3</sup>	$q_{30}$
Ресурс неметаллических полезных ископаемых	Запасы ископаемых, $x_{31}$ , т;	$q_{31}$
	$x_{32}$ , м <sup>3</sup>	$q_{32}$
Ресурс металлических полезных ископаемых	Запасы ископаемых, $x_{33}$ , т	$q_{33}$
Ресурс геологического пространства	Относительный объем для инженерно-хозяйственной деятельности, $x_{34}$ , %	$q_{34}$
Ресурс, качество и доступность воды	Запасы воды, $x_{35}$ , м <sup>3</sup>	$q_{35}$
	Общая минерализация, $x_{36}$ , г/л	$q_{36}$
Почвенный ресурс и его плодородие	Запасы гумуса $x_{37}$ , % от природного; плодородие почв $x_{38}$ , % от потенциального	$q_{37}$
		$q_{38}$
<i>Эколого-геохимическая</i>		
Загрязненность грунтов тяжелыми металлами	Превышение ПДК/ОДК, $x_{39}$ ;	$q_{39}$
	$x_{40}$ , ПДУ	$q_{40}$
	Суммарный показатель загрязнения, $x_{41}$ , $Z_c$	$q_{41}$

Критерий	Параметры ( $x_i$ )	Преобразованные (безразмерные) параметры, $q_i$
Загрязненность грунтов органическими токсикантами	Превышение ПДК/ОДК, $x_{42}$ ; $x_{43}$ , ПДУ	$q_{42}$ $q_{43}$
Загрязненность грунтов радионуклидами	Превышение ПДК/ОДК, $x_{44}$ ; $x_{45}$ , ПДУ	$q_{44}$ $q_{45}$
Загрязненность грунтов патогенными организмами	Индекс БГКП, $x_{46}$ ; индекс энтерококков $x_{47}$ и др.	$q_{46}$ $q_{47}$
Загрязненность грунтов пестицидами	Превышение ПДК/ОДУ, $x_{48}$	$q_{48}$
Газогеохимическая загрязненность	Превышение ПДК, ПДУ, $x_{49}$	$q_{49}$
Геохимическая миграция веществ	Скорость миграции (подвижность элементов); коэффициенты: фильтрации, $x_{50}$ , м/сут; диффузии, $x_{51}$ , см <sup>2</sup> /с, осмоса, $x_{52}$ , см <sup>5</sup> /моль·с и др.	$q_{50}$ $q_{51}$ $q_{52}$
Наличие защитного геохимического барьера	Тип барьера и его параметры: мощность, $x_{53}$ , м; сорбционная способность, $x_{54}$ , % и др.	$q_{53}$ $q_{54}$
<i>Эколого-геодинамическая</i>		
Парагенез природных и инженерно-геологических процессов: эндогенных экзогенных	Интенсивность проявления процесса по СП 115.13330.2016: $x_{55-56}$ , $x_{57-67}$	$q_{55-56}$ $q_{57-67}$
<i>Эколого-геофизическая</i>		
Наличие техногенных аномалий геофизических полей: теплого вибрационного электромагнитного ультразвукового акустического радиационного	Влияние поля на человека: Тепловая аномалия, $x_{68}$ , °С Вибрационная аномалия, $x_{69}$ , МГц Аномалия электромагнитного поля, $x_{70}$ , Н Аномалия ультразвукового поля, $x_{71}$ , Гц, дБ Акустическая аномалия, $x_{72}$ , дБ Аномалия радиационного поля, $x_{73}$ , мкЗв Плотность потока радона, $x_{74}$ ; ЭРОА радона, $x_{75}$	$q_{68}$ $q_{69}$ $q_{70}$ $q_{71}$ $q_{72}$ $q_{73}$ $q_{74}$ $q_{75}$
Наличие геопатогенных зон	Отклонения заболеваемости у людей, $x_{76}$ , %	$q_{76}$

Примечание: ПДК — предельно-допустимый уровень; ОДУ — ориентировочно-допустимый уровень, ПДУ — предельно допустимый уровень; ЭРОА — эквивалентная равновесная объемная активность; ЭГП — экзогенный геологический процесс.

весовых коэффициентов  $w_i$ ; 5) расчет значений  $Q_i$  и составление шкалы интегрального показателя; б) применение метода и шкалы для оценки анализируемой экосистемы.

В соответствии с этим данный метод поэтапно применим для получения интегральной оценки особенностей абиотических сред экосистем на основе анализа экологических функций литосферы.

*Этап 1. Обоснование системы критериев* диагностирования экосистем строится на основе параметров экологических функций литосферы — массива грунтов (литотопа), влияющих на существование биоты. Для этого используется набор критериев оценки состояния эколого-геологических условий и их компонент [Трофимов, 2012].

При этом набор критериев для природных (биоцентрических) экосистем и для техногенно-трансформированных или антропогенных (антропоцентрических) экосистем, в которых велика роль социума (человека) и учитываются потребности для развития цивилизации, будет существенно различным (табл. 3). Для каждого критерия указываются

параметры (или набор параметров) ( $x_i$ ), характеризующие экологические функции рассматриваемого массива грунтов (литотопа) в пределах данной эколого-геологической системы.

*Этап 2. Переход от указанных в табл. 3 параметров ( $x_i$ ) к безразмерным показателям ( $q_i$ )* осуществляется путем их нормирования. Для этого на основе данных работы [Хованов, 1996] с помощью несложных преобразований избавляются от размерности исходных характеристик так, чтобы наилучшим условиям по каждому критерию соответствовало значение, равное 0, а наихудшим — равное 1 (можно наоборот). Такое преобразование, можно выполнить следующим образом [Хованов, 1996]. Для критериев первого типа введем правило перевода в виде:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left( \frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 1, & \text{при } x_i > \max_i. \end{cases}$$

Таблица 4

**Принципиальная схема взаимоувязанной оценки состояния эколого-геологических условий, биоты и экосистемы**  
[Трофимов, 2005 с изменениями]

Оцениваемый параметр		Категории (уровни)			
		I	II	III	IV
Эколого-геологические условия		экологическая норма	экологический риск	экологический кризис	экологическое бедствие
Условия гомеостаза экосистемы		Не вызывает реакции (возмущения экосистемы)	«Предел толерантности» экосистемы, ее способность противостоять внешнему воздействию		Разрушение, гибель экосистемы
Экосистема (по Б.В. Виноградову)		Экологическая норма	Экологический риск	Экологический кризис	Экологическое бедствие
Гигиеническое состояние среды (по В.М. Прусакову и К.А. Буштуеву)		Малоопасное	Умеренно опасное	Опасное	Чрезвычайно опасное
Состояние здоровья человека		Здоровое	Напряжение	Утомление	Болезнь
Условия жизнедеятельности человека		Комфортные	Дискомфортные	Сильно дискомфортные	Опасные
Литосфера и ее компоненты		Удовлетворительное (благоприятное) состояние	Условно удовлетворительное (относительно неблагоприятное) состояние	Неудовлетворительное (весьма неблагоприятное) состояние	Катастрофическое состояние
Компоненты эколого-геологических условий	Ресурсное воздействие	Слабое	Умеренное	Сильное	Опасное
	Геодинамическое воздействие	Слабое	Умеренное	Сильное	Опасное
	Геохимическое воздействие	Слабое	Умеренное	Сильное	Опасное
	Геофизическое воздействие	Слабое	Умеренное	Сильное	Опасное
	Качество геологического пространства	Высокое	Среднее (повышенное)	Пониженное	Низкое

В этих уравнениях:  $q_i$  — преобразованное значение из табл.2;  $x_i$  — текущее значение из табл. 3;  $\min_i$  — минимальное (фоновое, допустимое, безопасное, предельно-допустимое и т.п.) значение критерия;  $\max_i$  — максимальное значение критерия (лучше ориентироваться на региональные, но не абсолютные максимумы критериев). Исследователь должен дополнительно выбрать показатель степени  $\lambda$ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции  $q_i(x_i)$ : при  $\lambda > 1$  соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при  $\lambda < 1$  — вверх [Хованов, 1996].

Для критериев второго типа аналогично вводится правило перевода в виде:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left( \frac{\max_i - \min_i}{x_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 0, & \text{при } x_i > \max_i. \end{cases}$$

Диапазон изменения  $q_i$  всегда находится в пределах от 0 до 1. Таким образом, исходные критерии в различных шкалах измерения (абсолютные и средние величины в конкретных единицах измерения, относительные или балльные оценки и т.п.) приводятся к безразмерным шкалам, после чего над их значениями можно производить математические

действия с целью получения интегрального показателя.

Для того, чтобы задать минимальные и максимальные значения критериев, как правило, используются минимальное ( $\min_i$ ) и максимальное ( $\max_i$ ) значения из каждой шкалы исходных характеристик, указанных в табл. 3.

*Этап 3.* Выбор вида интегрального показателя  $Q(q, w)$ , который строится таким образом, что зависит не только от показателей  $q_i$ , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами  $w_i$ , сумма которых должна равняться 1,0 ( $0 \leq w_i \leq 1$ ). В качестве выражения для интегрального показателя чаще всего задается линейная свертка показателей вида:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n q_i w_i,$$

где  $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  — число критериев оценивания.

*Этап 4.* Ввод оценки весовых коэффициентов ( $w_i$ ). В простейшем случае — при равенстве вклада факторов,  $w_i = 1/n$ , где  $n$  — число критериев (равноважные критерии).

В других, более сложных, случаях (разнозначные критерии — неравновесный учет параметров) приоритет веса критериев обосновывается исследователем, исходя из особенностей рассматриваемой

Таблица 5

Оценочная классификация интегрального показателя

Интегральный показатель абиотического компонента	Классы экологического состояния			
	Удовлетворительное	Условно удовлетворительное	Неудовлетворительное	Катастрофическое
Ресурсный, $Q_p$	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1
Геохимический, $Q_{zx}$	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1
Геодинамический, $Q_{zd}$	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1
Геофизический, $Q_{zф}$	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1
Общий, $Q_o$	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1

экосистемы. Это один из важнейших вопросов при практическом определении интегрального показателя абиотических сред экосистем. В этих случаях для многокритериальных задач применяются различные методы сравнительного системного анализа — например, задание уровней притязаний или нулевой точки, отбор недоминируемых критериев и др. [Королев, 2020; Хованов, 1996].

*Этап 5.* Для левой и правой границ каждого класса исходной классификации рассчитывается значение  $Q_i$ . В результате выполнения пятого этапа получаем шкалу интегрального показателя по классам состояния при условии равновесного (неравновесного) учета всех параметров оценивания.

*Этап 6.* На завершающем этапе по собранным данным определяют значение интегрального по-

казателя состояния экосистемы в определенный момент времени.

Для получения шкалы (оценочной классификации) интегрального показателя состояния экосистем согласно В.Т. Трофимову [2005], можно использовать градации табл. 2 или принципиальную схему взаимосвязанной оценки состояния эколого-геологических условий, биоты и экосистемы (табл. 4).

В табл. 5 градации классов интегральных показателей для каждой из экологических функций (ресурсной  $Q_p$ , геохимической  $Q_{zx}$ , геодинамической  $Q_{zd}$  и геофизической  $Q_{zф}$ ) даны через 0,25 ед.

Общий интегральный показатель ( $Q_o$ ) рассчитывается по сумме всех интегральных показателей ( $Q_i$ ) перечисленных экологических функций. Градации общего интегрального показателя экологического состояния системы также даются через 0,25 ед.

**Заключение.** Экологические функции выступают как фундаментальные интегральные характеристики особенностей абиотических сред экосистем. Из рассмотренных подходов для их оценки наиболее целесообразным является метод сводных показателей (МСП), позволяющий в полной мере получить обоснованные интегральные показатели состояния экосистем.

На основе предложенных интегральных показателей абиотических сред могут осуществляться оценки современного состояния экосистем или эколого-геологических систем в данный момент времени, их динамики, строиться оценочные карты состояния экосистем, проводится сравнительный анализ экосистем или эколого-геологических систем, как их составной части.

Необходимо введение интегральных показателей состояния экосистем в нормативные документы по инженерно-экологическим изысканиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова Л.В., Васильев В.Ю., Дмитриев В.В. и др. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем / Под ред. В.В. Дмитриева и Н.В. Хованова. Деп. ВИНТИ № 2342В00, 2000. 275 с.

Алимов А.Ф., Дмитриев В.В., Флоринская Т.М. и др. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды городских территорий / Под ред. А.К. Фролова. СПб., 1999. 253 с.

Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.

Дмитриев В.В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера. 2010. Т. 2, № 3. С. 507–520.

Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество, среда, развитие. 2009. № 4. С. 146–165.

Дмитриев В.В. Экологическая оценка, оценка качества среды, экологическое нормирование. Основные определения // Дмитриев В.В., Фруммин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. С. 10–29.

Дмитриев В.В., Дмитриев Н.В., Воскресенская В.А. и др. Развитие методологии интегральной оценки экологической целостности геосистем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8 (часть 1). С. 78–85.

Дмитриев В.В., Фруммин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем: Учебное пособие. СПб.: Наука, 2004. 294 с.

Караваева Т.И., Тихонов В.П. Интегральная оценка состояния экосистем: обзор показателей для целей инженерно-экологических изысканий // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2022. № 5. С. 265–271.

Королёв В.А. Методология научных исследований в инженерной геологии: Уч. пособие М.: ООО СамПолиграфист, 2020. 353 с.

Снакин В.В., Мельченко В.Е., Буковский Р.О. и др. Оценка состояния и устойчивости экосистем. М., 1992. 127 с.

Трофимов В.Т. Об экологических функциях абиотических сфер Земли // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2005. № 2. С. 59–65.

Трофимов В.Т. Состояние эколого-геологических условий // Базовые понятия инженерной геологии и эко-

логической геологии: 280 основных терминов / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: ОАО Геомаркетинг, 2012. С. 214–215.

*Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г.* Экологическая геология: Учебник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. 415 с.

*Трофимов В.Т., Харькина М.А.* О содержании и назначении геоэкологических карт // Инженерные изыскания. 2017а. № 1. С. 32–38.

*Трофимов В.Т., Харькина М.А.* Предложения по улучшению содержания нормативно-технических документов

по инженерно-экологическим изысканиям // инженерные изыскания. 2017б. № 4. С. 14–19.

*Трофимов В.Т., Харькина М.А., Барабошкина Т.А., Жигалин А.Д.* Экологические функции абиотических сфер Земли. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. 608 с.

*Хованов Н.В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1996. 196 с.

Статья поступила в редакцию 29.10.2023,  
одобрена после рецензирования 19.12.2023,  
принята к публикации 13.05.2024