



**Издатель**

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»  
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

**ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ**

<http://ecopri.ru>

**№ 2 (40). Июнь, 2021**

**Главный редактор**

А. В. Коросов

**Редакционный совет**

В. Н. Большаков  
А. В. Воронин  
Э. В. Ивантер  
Н. Н. Немова  
Г. С. Розенберг  
А. Ф. Титов

**Редакционная коллегия**

Г. С. Антипина  
В. В. Вапиров  
Т. О. Волкова  
Е. П. Иешко  
В. А. Илюха  
Н. М. Калинкина  
А. М. Макаров  
А. Ю. Мейгал  
В. К. Шитиков  
В. Н. Якимов  
A. Gugolek B.  
J. B. Jakovlev  
R. Krasnov  
J. P. Kurhinen

**Службы поддержки**

А. А. Зорина  
А. Г. Марахтанов  
Е. В. Голубев  
С. Л. Смирнова  
Н. Д. Чернышева  
М. Л. Киреева

**ISSN 2304-6465**

**Адрес редакции**

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: [ecopri@psu.karelia.ru](mailto:ecopri@psu.karelia.ru)

<http://ecopri.ru>





УДК УДК 502.15:574.635.15:574.635

# ЭМЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПЫТ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

**ПОЛЯКОВА**  
Оксана Сергеевна

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, [oksanochka84@list.ru](mailto:oksanochka84@list.ru)*

**СЕМЕНОВ**  
Сергей Юрьевич

*кандидат биологических наук, Томский государственный университет, [p9138009960@gmail.com](mailto:p9138009960@gmail.com)*

## Ключевые слова:

эксергия  
эмергия  
канализационные  
очистные сооружения  
экологическая  
инженерия  
экологический эффект

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы оснований и развития эмергетического анализа (ЭМАН), понятийный аппарат и методики расчета основных эмергетических показателей. Эмергия – это величина эксергии одного вида, которая прямо или косвенно необходима для поддержания процесса или накопления энергии другого вида или вещества. По мере усложнения системы величина энергии, заключенной в объекте (услуге), уменьшается, а степень ее преобразованности (трансформированности) возрастает. Эмергия измеряется в солнечных Дж, которые могут быть оценены с помощью трех различных эмергетических единиц: степенью трансформированности, специфической эмергией и эмергией денежной единицы. В опубликованных русскоязычных работах в качестве эквивалента английского термина *transformity* используется термин «трансформация». Более адекватным является термин «degree of transformation», объединяющий *transformity, specific emergy and emergy on money*. Подход Г. Одума к оценке предприятий для защиты окружающей среды от загрязнений основан на понимании сточных вод как высокоценного ресурса. Но, в отсутствие экономических технологий возвращения отходов в производственные циклы, сточные воды, например, сегодня большей частью обезвреживаются, а не утилизируются. Целью создания и функционирования канализационных очистных сооружений в настоящее время является снижение загрязнения природы. Ряд исследователей (Вассало, Цзо, Чен) в эмергетическую стоимость функционирования природоохранного объекта включают экосистемные траты на нейтрализацию негативного воздействия образующихся отходов. Поляковой и Семеновым предложен эмергетический индекс для оценки экологической эффективности природозащитных предприятий, характеризующий снижение (увеличение) нагрузки на биосферу за счет создания и функционирования канализационных очистных сооружений. В методологии эмергетического анализа отсутствует оценка замены одних экосистем другими. Поэтому дальнейшее развитие анализа должно включать разработку специального аппарата для такой оценки.

© Петрозаводский государственный университет

**Рецензент:** А. В. Поздняков

Получена: 03 декабря 2020 года

Подписана к печати: 15 июня 2021 года

## Введение

Общественным структурам (государствам, поселениям, предприятиям и пр.) для успешного осуществления хозяйственно-экономической деятельности необходимо объективно оценивать понесенные в ходе этой деятельности издержки и образующуюся прибыль. Поэтому для анализа экономических (производственных, логистических, финансовых), образовательных, здравоохранительных, культурных и др.) систем к настоящему времени разработаны методы, которые можно разделить на два типа: стоимостные (собственно стоимостной, анализ жизненного цикла) и энергетические (собственно энергетический, эксергетический, эмергетический).

Стоимостной анализ широко критикуется специалистами за свою конъюнктурность. Часть товаров и услуг, особенно связанную с природными системами, адекватно выразить через денежный эквивалент не представляется возможным. Для характеристики этой категории товаров (объектов) был предложен термин «нематериальные» (Булатов, 2004). Таким образом, широко распространенный и давно применяемый в экономике стоимостной анализ (затраты-выгоды) не может достаточно корректно работать с нематериальными товарами. Это выражается в неспособности стоимостного анализа дать денежную оценку многим природным эффектам, причем даже таким, которые предсказуемы в количественном выражении. Например, инженеры способны вычислить понижение уровня нижнего течения реки (вследствие строительства плотины), а биологи способны предсказать влияние на гидробионтов, которые подвергнутся наибольшему вымиранию. Однако никто не может корректно рассчитать стоимость каждого утраченного вида.

Можно привести еще один пример несостоятельности стоимостного анализа. Так, солнечное лето с умеренным количеством осадков характеризуется хорошим урожаем пшеницы, и закупочные цены на нее снижаются. То есть при максимальном вкладе природной энергии образуются низкие цены: рынок низко ценит «хорошую погоду» в любой отрасли экономики, при ней происходит резкое увеличение предложения и обесценивание продукта (Иванова, 2002). Использование денежной платы для оценки ресурса окружающей среды сильно недооценивает сделанные в него вложения.

Несмотря на обозначенные недостатки стоимостного анализа, он занимает главенствующее место среди существующих анализов. Все технико-экономические обоснования реализуются через стоимостные характеристики. Стоимостной анализ подвергся серьезной корректировке с течением времени, появился «анализ жизненного цикла», представляющий собой разновидность стоимостного анализа, но со своими особенностями и чертами. Примером «анализа жизненного цикла» может послужить следующая иллюстрация: приобретение автотранспортного средства требует от его владельца учитывать не только стоимость авто, но и эксплуатационные издержки (расход горюче-смазочного материала (ГСМ), частота поломок, цена комплектующих деталей, страховка), а также траты на утилизацию. Таким образом, полная стоимость использования автомобиля будет в разы выше, чем затраты на его приобретение.

При наличии замечаний, предъявляемых к стоимостному анализу, исследователи пытались разработать альтернативный подход к оценке функционирования природных и антропогенных систем. Таким новым подходом явился энергетический анализ, а выгодным отличием его от стоимостного анализа выступает то, что энергия не подвержена никакой конъюнктуре в отличие от финансовых потоков. Поэтому энергетический подход является более адекватным для оценки экосистем. Но и у энергетического анализа есть свои недостатки.

Традиционный энергетический анализ не учитывает «качества» энергии. Например, эффективность превращения электрической энергии в тепловую, механическую, в свет гораздо выше, а при преобразовании топлив в эти же виды энергий коэффициент полезного действия (КПД) в разы ниже. Для того, чтобы этот недостаток исключить, используется эксергетический анализ, который учитывает КПД тех или иных энергетических преобразований (Yunus, 2015). В расчет берется не вся энергия, а только полезная энергия, выражаемая как доля от затраченной. Так, на тепловых электростанциях от полной теплоты сгорания угля около 50 % превращается в электроэнергию, при преобразовании электрического тока в свет (люминесцентными лампами) не более 30 %. Эксергетический анализ учитывает только эти доли. Результат – это количество джоулей эксергии, затраченных на единицу продукции. В целом этот тип анализа позволяет вычислить полную

эксергию производственного цикла. В то же время, будучи свободным от антропоцентризма, характерного для стоимостных методов, эксергетический анализ достаточно жестко ориентирован на исследование техносферы (Казаков и др., 2013), а природные экосистемы трудно поддаются описанию с помощью законов термодинамики. Природные материалы играют существенную роль в технологическом цикле, и этот вклад или вообще не учитывается, или плохо учитывается.

Эту проблему призван решать эмергетический анализ Г. Одума. Поскольку научно-исследовательских работ, излагающих сущность ЭМАН, на русском языке представлено минимальное количество, то целесообразно предложить наше понимание подхода Г. Одума для оценки систем.

Цель работы – представить краткое изложение концепции ЭМАН, выявить тенденции и элементы развития для расширения практики его использования в различного типа обоснованиях проектов создания и модернизации систем защиты окружающей среды, а также определения экологического ущерба природе от антропогенной деятельности.

## Аналитический обзор

Материалами исследования являются англо- и русскоязычные публикации о разработке, критике и применении эмергетического анализа, период написания которых – с 1971 по 2019 г. При написании работы в разной степени изучено более 300 публикаций, включая статьи, индексируемые в РИНЦ, Web of Science, Scopus, а также проанализированы диссертации, учебные пособия и материалы конференций. В настоящей статье упоминается 60 основополагающих статей. Количество англоязычных статей, в которых обсуждается и применяется ЭМАН, превышает 2000. Статьи публикуются в таких журналах, как *Journal of Cleaner Production*, *Ecological Modelling*, *Fuel and Energy Abstracts*, *Ecological Indicators*, *Agriculture, Ecosystems & Environment* и др., с численными показателями цитируемости (импакт-фактором) от 2 до 7. Русскоязычных статей подобного плана в 75 раз меньше (31 статья).

Метод исследования материала включает хронологический и логический анализы содержания этих публикаций на предмет расширения и уточнения понятийного аппарата анализа, а также модернизацию классических эмергетических индексов относительно

исследуемого объекта. В статье изучаются методики расчета основных эмергетических показателей (индекс эмергетического выхода, индекс нагрузки на окружающую среду, индекс устойчивости), а также исследуются примеры использования ЭМАН в практике оценки товарообмена между странами, влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения, функционирование природоохранных объектов.

Основоположником ЭМАН является Г. Одум, который показал неравноценность разных видов энергии (механической, тепловой, электрической) (Odum, 1971) и предложил единую методику оценки не только разных типов энергии, но и вещества, информации, природных, антропогенных, в том числе и культурных, процессов. В продолжение своей работы Г. Одум разработал модель, в которой объекты и процессы распределены в соответствии с их энергосодержанием (все затраты энергии на возникновение или создание объекта или процесса) (Odum, 1996). В модели используется понятие эксергии, учитывающее деградацию энергии в любых процессах в соответствии со вторым началом термодинамики. Базовым понятием модели объявлена эмергия – величина эксергии одного вида, которая прямо или опосредованно используется для поддержания процесса или накопления энергии другого вида или вещества. В качестве единицы измерения эмергии в модели принят джоуль солнечного излучения – эмджоуль. Основой модели выступает закон максимизации эмергетической мощности, в соответствии с которым все самоорганизующиеся системы (включая экономику) в своем развитии увеличивают поток используемой эмергии (эмергетическую мощность).

Примером обозначенной модели служит иерархия информации (рис. 1) в течение человеческой жизни и по категориям образованных граждан в Соединенных Штатах Америки за 1998 г. (Odum, 1996). Жизнедеятельность большей части населения страны является основой для жизни меньшего числа людей, но работающих на более высоких уровнях социальной организации, а на вершине иерархии находятся политические лидеры. Трансформация в каждой категории граждан была получена путем деления годового совокупного эмергетического потока на количество людей в каждой категории и годовую метаболическую энергию на человека. На протяжении всей биологической и последующей культурной эволюции чело-

вещество двигалось к более высоким трансформациям, поскольку все больше солнечной эмергии поступало в общую информа-

ционную сеть общества. Человеческий прогресс оценивается переходом слева направо по информационной иерархии.

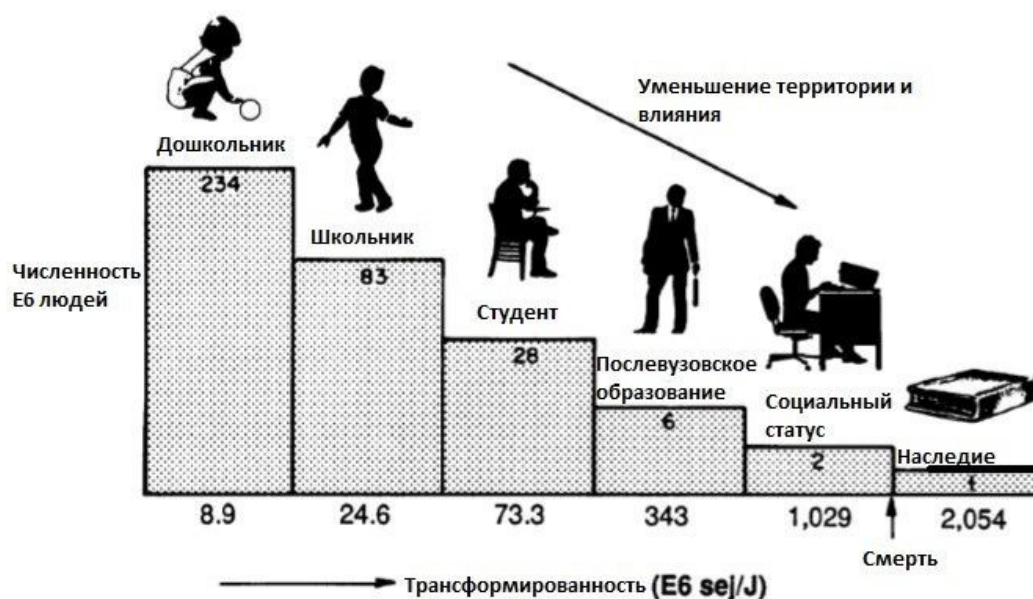


Рис. 1. Иерархические уровни образования, достигаемые по мере человеческого взросления и развития. Население Соединенных Штатов в каждой категории представлено как функция солнечной трансформированности

Fig. 1. Hierarchical levels of education achieved as a person grows and develops. The US population in each category is graphed as a function of solar transformity

По мере усложнения системы величина заключенной в объекте (услуге) энергии уменьшается, а степень ее преобразованности (трансформированность) возрастает. Так, консументы заключают в себе более трансформированную (преобразованную) энергию в сравнении с продуцентами, а электрическая энергия в сравнении с тепловой энергией, информация в сравнении с трудом и др. (Odum, Odum, 1983) (рис. 2).

Г. Одумом разработан алгоритм учета эмергии, при котором ежегодный эмергетический поток, поступающий в биосферу от Солнца, луны, внутреннего тепла Земли, является базовым уровнем (Odum, 1996). Эмергия этого уровня представляет собой движущую силу для всех последующих физических процессов в биосфере, а запасается она в объектах (ископаемое топливо, руды, биомасса леса, органический компонент почвы) и используется в дальнейшем. Доля поступающей эмергии, необходимая на создание единицы исходящей эксергии, представляет собой солнечную трансформацию (сэДж/Дж).

Совокупная солнечная эмергия ( $U$ ), управ-

ляющая производственным процессом продукта ( $P$ ), выражается как:

$$U = \sum_{i=1}^n E_i \cdot Tr_i = E_i \cdot Tr_i, \quad (1)$$

где  $E_i$  – эксергия,  $Tr_i$  – трансформация солнечного излучения  $i$ -ого входящего потока  $P_i$ .  $U$  считается от всех независимых входящих потоков (т. е. потоки, которые не происходят от схожих источников),  $E_i$  и  $Tr_i$  – это  $n$ -пространственные векторы, зависящие от входящих потоков в процесс.

Трансформация солнечного излучения  $Tr_i$  входящего потока  $P_i$  определяется следующим образом:

$$Tr_i = \frac{U_i}{E_i} = \sum_j E_{ij} \cdot \frac{Tr_{ji}}{E_i} = E_j \cdot \frac{Tr_j}{E_i} \quad j = 1, \dots, m \quad (2)$$

где  $U_i$  – солнечная эмергия, управляющая производством  $P_i$  в то время как  $E_{ij}$  – эксергия и  $Tr_{ji}$  – солнечная трансформация  $j$ -го входящего потока, содействующего  $P_i$ . По определению, трансформация солнечного излучения равна 1. Замена (2) на (1) дает следующую формулу:

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} \cdot Tr_{ji} = E \cdot Tr, \quad (3)$$

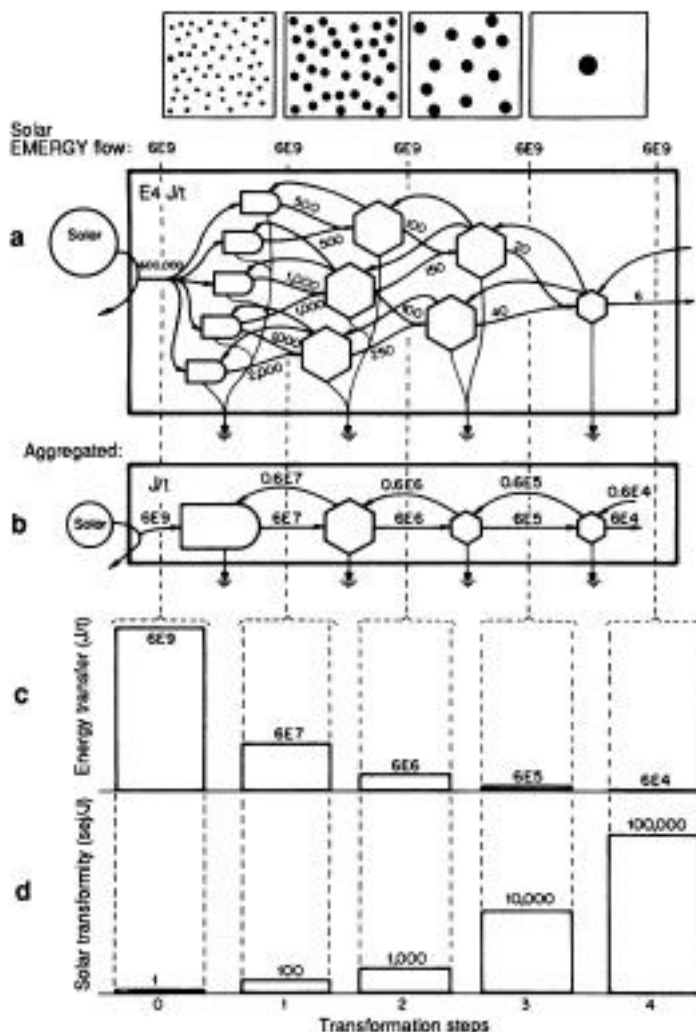


Рис. 2. Иерархия энергий: а – сеть с энергетическими потоками, б – преобразованная энергетическая сеть в цепь, с – график энергетических потоков на каждом уровне энергетической иерархии, д – солнечные трансформации на каждом уровне иерархии

Fig. 2. The energy hierarchy: a – network with energy flows, b – converted energy network to a circuit, c – graph of energy flows at each level of the energy hierarchy, d – solar transformations at each level of the hierarchy

где  $E$  – матрица всех косвенных эксергетических входящих потоков, поддерживающих производственные процессы,  $Tr$  – матрица «трансформация», которая соединяет каждый поток с совокупной эмергией  $U$ .

Поступающие потоки  $E_i$  в процесс могут

быть локально возобновимыми ( $R_i$ ), локально невозобновимыми ( $N_i$ ) или привнесенными извне ( $F_i$ ; обратные связи, привнесенные извне, усиливают процесс). Поэтому эквивалентная формула для (1) это:

$$U = \sum_{i=1}^n Tr_i \cdot R_i + \sum_{j=1}^{n'} Tr_j \cdot R_j + \sum_{k=1}^{n''} Tr_k \cdot R_k. \quad (4)$$

Совокупная солнечная эмергия  $U$ , управляющая процессом, определяется как мера

потребленного ресурса.

Трансформация исходящего потока – это:

$$Tr_{out} = \frac{\text{совокупная эмергия } U \text{ управляющая процессом}}{\text{доступная энергия (эксергия) исходящего потока}} = \frac{\sum_i Tr_i \cdot R_i + \sum_j Tr_j \cdot R_j + \sum_k Tr_k \cdot R_k}{E_{out}} \quad (5)$$

Эмергия обычно измеряется в солнечных Дж, которые могут быть оценены с помощью трех различных эмергетических единиц: степенью трансформированности, специфической эмергией и эмергией на денежную единицу. Степень трансформированности – это затраченная эмергия на единицу энергетического потока, обычно выражаемая в единицах эмДж/Дж. Специфическая эмергия – затраченная на создание единицы определенного вещества (массы) (сэДж/г). Эмергия на денежную единицу (сэДж/\$) – это отношение эмергии, используемой для создания продукта, к соответствующим финансовым затратам. В некоторых случаях

имеет смысл использовать эмергозатраты на единицу рабочего времени (сэДж/час) (Brown, Herendeen, 1996). Transformity энергии солнечного излучения большинства товаров, объектов и услуг вычислены Г. Одумом (Odum, 1988), примеры некоторых из них приведены в табл. 1.

В опубликованных русскоязычных работах в качестве эквивалента английского термина transformity используется термин «трансформация», который по смыслу обозначает процесс, содержание же transformity ближе к значению «результат». Поэтому более адекватным переводом был бы термин «степень трансформированности».

Таблица 1. Степень трансформированности и удельная эмергозатратность энергетических потоков

Наименование потока	Степень трансформированности (сэДж/Дж) и удельная эмергозатратность
Потоки из окружающей среды	
Солнечная радиация	1 [13]
Ветер	1.5E + 03 [13]
Геопотенциал дождя	1.0E + 04 [13]
Химический потенциал дождя	1.8E + 04 [13]
Кинетическое воздействие дождя	2.4E + 05 сэДж/Дж
Энергия приливов	7.39E + 04 сэДж/Дж
Почвы	1.18E + 04 сэДж/Дж
Растительность	6.7E + 03 сэДж/Дж
Биомасса леса	3.6E + 04 сэДж/Дж
Торф	5.7E + 04 сэДж/Дж
Рыба	8.4E + 06 сэДж/Дж
Рогоз	6.9E + 03 сэДж/Дж
Строительные материалы	
Кирпичи	2.00E + 09 сэДж/г
Бетон	4.7E + 09
Оборудование	6.7E + 09
Железо	1.78E + 09 сэДж/г
Полезные ископаемые	
Уголь	9.7E + 04 сэДж/Дж
Нефть	1.5E + 05 сэДж/Дж
Известняк	1 E9 сэДж/г [12]
Природный газ	43500
Ядерная энергия	5.4E + 05 сэДж/Дж
Экономические показатели	
Прибыль	1.31E + 12 сэДж/\$
Работа операторов по обслуживанию очистных сооружений	1.31E + 12 сэДж/\$
Поступающие стоки (Дж)	3.73E + 06
Вода, необходимая на разбавление ТБК (Дж)	48000

Как видно из таблицы, по мере усложнения организации объекта степень трансформированности увеличивается.

Методологией эмергетического анализа является системный подход, осуществляемый сверху вниз. Первый этап анализа – это составление детальной энергетической диаграммы, являющейся начальной сетью (схемой) общего представления о системе, которая позволяет сравнивать величины поступающих, исходящих потоков и их аккумуляцию. Диаграмма является эскизным проектом взаимоотношений между компонентами, направлениями обмена и ресурсными потоками. Это достигается за счет:

а) определения границы системы для правильного учета поступающих потоков;

б) составления списка главных компонентов, которым придается большое значение на изучаемом уровне;

в) знания количественных характеристик процессов, происходящих в пределах границы (потоков, взаимоотношений, взаимодействий, процессов производства и потребления, обязательно включающих финансовые операции и труд);

г) использования языка символов.

Г. Одумом был предложен ряд символов, которые широко используются с 1965 г. для написания системных диаграмм. В русскоязычной литературе эти символы представлены в работе (Фаминская, Потехина, 2011).

На основании разработанной энергетической системной диаграммы осуществляется второй этап анализа – составление эмергетической таблицы, в которой отражаются поступающие в систему потоки, их энергетическое значение, трансформации этих потоков и вычисленная величина эмергии.

Последний этап эмергетического анализа – это расчет эмергетических индексов, на основании которых делаются выводы о преимуществах и недостатках сравниваемых систем.

Основными эмергетическими индексами, используемыми в работах Г. Одума и сотрудников, являются коэффициент эмергетического выхода ( $EYR$  – energy yield ratio), коэффициент нагрузки на окружающую среду ( $ELR$  – environmental loading ratio) и индекс эмергетической устойчивости ( $ESI$  – energy sustainability index) (Odum, 1996).

Коэффициент эмергетического выхода ( $EYR$ ) – это отношение суммы эмергий

возобновляемых ( $R$ ), невозобновляемых ( $N$ ) и закупленных ( $F$ ) ресурсов к эмергии приобретенных ресурсов ( $F$ ):

$$EYR = \frac{R + N + F}{F} \quad (6)$$

Коэффициент выступает обязательным параметром анализа производственных и экономических систем, характеризуя эмергетическую целесообразность создания и функционирования рассматриваемой системы в конкретных условиях. Система, имеющая более высокие значения индекса, является экономически предпочтительной.

Коэффициент нагрузки на окружающую среду ( $ELR$ ) определяется как отношение суммы невозобновляемой и закупленной эмергии к возобновляемой эмергии:

$$ELR = \frac{N + F}{R} \quad (7)$$

Коэффициент нагрузки на окружающую среду характеризует ресурсную истощительность технологии (системы). Предпочтительными являются более низкие значения индекса.

Индекс  $ESI$  (эмергетический индекс устойчивости), равный отношению экономичности ( $EYR$ ) к истощительности ( $ELR$ ), определяет степень жизнеспособности объекта:

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} = \frac{R^2 + NR + FR}{FN + F^2} \quad (8)$$

В целом три рассмотренных параметра дают наиболее общую, «эскизную» характеристику производственного объекта и являются, как отмечено выше, более объективными показателями в сравнении с такими аналогичными стоимостными параметрами, как рентабельность, общая ресурсоемкость и степень независимости от платных ресурсов (рынка).

Количественная оценка всех потоков энергии и вещества в единой размерности (энергия солнечного излучения), не подверженной конъюнктуре, позволяет использовать ее в разнообразных комбинациях для создания достаточно информативных индексов, коэффициентов, параметров. Применение эмергетического анализа на практике отображено в проанализированных ниже работах.



Первой работой с применением ЭМАН выступает исследование Г. Одума по реальной (действительной) оценке международной торговли креветками между Эквадором и США (Odum, Arding, 1991). Результатом исследования являются данные по импорту и экспорту. Так, импортируется в страну 62E + 20 сЭДж/год, а экспортируется 314E + 20 сЭДж/год, соответственно, разница составляет 252, что свидетельствует об неэквивалентности обмена.

Следующее исследование, основанное на эмергетическом анализе, выполнено Г. Одумом с коллегами в рамках проекта «Биосфера 2» (Nelson et al., 2001). С целью выбора оптимальной системы жизнеобеспечения людей в замкнутом пространстве космического корабля проведена сравнительная оценка ресурсной эффективности трех систем очистки сточных вод: компактных аэрационных очистных сооружений на 40 жителей, конструированного болота в Акумале (Мексика) на 40 жителей и традиционных очистных сооружений Университета штата Флорида, рассчитанных на 40 тыс. жителей. По результатам проведенной работы исследователи делают вывод о том, что наиболее приемлемой системой для функционирования в замкнутом пространстве космического корабля выступает конструированное болото, т. к. оно потребляет минимальное количество закупленных (приобретенных) ресурсов. Конструированные болота также выгодны и с экономической точки зрения, т. к. меньше используют электричества по сравнению с двумя другими анализируемыми системами.

Комплексную эмергетическую оценку хозяйственной жизни г. Макао (Китайская Народная Республика), включая анализ обращения с отходами, выполнили К. Леи и Ж. Ванг (Lei et al., 2008; Lei, Wang, 2008). Анализ проводился по двум показателям: «эмергия, затрачиваемая на управление отходами / эмергия отхода», «эмергия сточных вод / эмергия приобретенных ресурсов». Интересным является пример по оценке энергетической безопасности Китая с использованием эмергетического анализа Х. Лу (Lu, Xu, 2019). Так, анализ свидетельствует об улучшении энергетической безопасности Китая в течение последних 50 лет относительно доступности ресурсов, экономической эффективности и воздействия на окружающую среду.

В последнее десятилетие ЭМАН широко

используется для оценки устойчивости многих систем, объединяющих в себе социоэкологические системы. Примеры включают оценку сельскохозяйственных систем (Lu et al., 2010; Wu et al., 2013; Yue et al., 2016), речных бассейнов (Chen et al., 2009; Campbell, Garmestani, 2012; Fonseca et al., 2017), городских систем (Jiang et al., 2009; Chen et al., 2010; Andric et al., 2017), болотных систем (Qin et al., 2000; Chen et al., 2009, 2011), инженерных сооружений (Han et al., 2014), экономических систем (Yang et al., 2010). Некоторые исследователи применяли ЭМАН для оценки процесса очистки сточных вод. Так, Бьёрклунд (Bjorklund et al., 2001) использует эмергетический анализ для оценки процесса обработки сточных вод. Гебер и Бьёрклунд (Geber, Bjorklund, 2002) анализируют использование ресурсов в трех системах обращения со стоками: традиционная трехступенчатая очистка стоков, очистные сооружения, дополненные технологией «constructed wetlands», и естественное болото. Паоло (Paolo et al., 2009) использует ЭМАН для оценки канализационных очистных сооружений на Лигурийском побережье. Дуан (Duan et al., 2011) применяет ЭМАН и анализ жизненного цикла для оценки городских водно-болотных угодий. Ян (Yang et al., 2016) использует эмергетический анализ для оценки скорости инфильтрации стоков через почвы в Циндао (Китай). Наибольшая интенсивность исследований по анализу ЭМАН наблюдается в Китайской Народной Республике (Zhang et al., 2009, 2010; Zuo et al., 2004).

Несмотря на растущую популярность и расширение сферы применения эмергетического анализа, в научной литературе имеется и достаточно большое количество публикаций с его обоснованной критикой. Анализ наиболее серьезных критических работ выполнен Броуном (Brown, Ulgiati, 2004). Он отмечает, что ряд авторов (Ayres, 1988; Cleveland et al., 2000; Mansson, McGlade, 1993; Spreng, 1988) характеризуют эмергетический анализ как упрощенный, алогичный, вводящий в заблуждение и не точный. Контраргументы указанной критике представлены в работах Г. Одума и М. Паттерсона (Odum, 1995; Patterson, 1993). Наиболее дискутируемым элементом эмергетического анализа является расчет величины трансформации, т. к. эмергетический метод не признает заключенной в ней некоторой доли неопределенности. Обобщенная трансформация про-

мышленных и геологических процессов используется в конкретных случаях без знания степени достоверности полученного результата. Например, трансформация природного газа представляет собой среднюю эффективность сгорания угля в котлах (Odum, 1996), но эта эффективность напрямую зависит от марки угля и типа природного газа, так же как и характеристик самого котла. Вычисление эмергии экономических процессов при помощи индекса эмергия/финансовые потоки тоже может быть некорректным и включать в себя двойные подсчеты (Ayres, 1988; Cleveland et al., 2000).

Развитие эмергетического анализа в постодумовский период для оценки функционирования природоохранных объектов привело к пониманию того, что эмергию, заключенную в отходах, необходимо включать в общую стоимость функционирования природоохранного предприятия. Для Г. Одума (такой) проблемы отходов не существовало, т. к. он рассматривал идеальную систему (замкнутое пространство космического корабля) с «нулевыми» отходами, но социально-экономическое развитие общества не соответствует обозначенной парадигме. Поэтому ряд исследователей (Вассалло, Цзо, Чен) в эмергетическую стоимость функционирования природоохранного объекта включают экосистемные траты на нейтрализацию негативного воздействия образующихся отходов. Вассалло (Vassallo, Paoli, 2009) предлагает оценивать не только все удельные эмергозатраты на территории очистных сооружений, но и экосистемные услуги, требуемые для полного обезвреживания стоков за пределами этой территории. Для иллюстрации методики объем таких природных услуг вычисляется им по количеству кислорода, необходимого для окисления остаточных концентраций органического вещества в приемном водоеме. При этом кислородный режим водоема является одним из важнейших параметров его функционирования. Но наличие кишечной микрофлоры, соединений фосфора, тяжелых металлов слабо связано с наличием кислорода в воде. Такой подход допустим, если все остальные параметры (кроме ХПК) в норме. Но на практике такие ситуации маловероятны, а значит, более общим подходом для оценки эмергетических затрат природы на обезвреживание воды в водоеме будет расчет разбавления.

Предложение Вассалло получило развитие в статье Му и соавторов (Mu et al.,

2009), где эмергетическая цена природных услуг, поступающих из окружающей среды на разбавление очищенных стоков, и экологические платежи предприятия за сброс загрязняющих веществ включаются в формулы классических индексов (*EYR*, *ELR*, *ESI*) и рассчитываются по формулам:

$$EYR_{iw} = \frac{R + N + F_1 + F_2 + F_3}{F_1 + F_2 + F_3 + E_w} \quad (9)$$

$$ELR_{iw} = \frac{N + F_1 + F_2 + E_w}{R + F_1 + F_3} \quad (10)$$

где *R* – возобновляемые ресурсы; *N* – невозобновляемые ресурсы; *F*<sub>1</sub> – вложения в продукцию (производство); *F*<sub>2</sub> – вложения в очистку сточных вод; *F*<sub>3</sub> – дополнительные вложения в защиту окружающей среды; *E<sub>w</sub>* – природные услуги, которые поступают из окружающей среды на разбавление сточных вод.

Понимание проблемы отходов остается на уровне работ Вассалло и Му, но дальнейшие поиски постоянно ведутся.

Неочевидным упущением существующих подходов в ЭМАН является отсутствие дифференцировки конструируемых (биоинженерных систем) экосистем, замещающих исходную (существующую) систему. Например, замещение пустыни степью или лесами – это положительный аспект, т. к. принято считать, что более сложные экосистемы предпочтительнее (с антропоцентрических позиций). Для объективной оценки такого замещения необходимо разработать специальный индекс, например «индекс замещения». Какой он будет по сути – открытый вопрос, в этом и видится развитие эмергетического анализа в будущем.

Первой публикацией результатов исследования с применением ЭМАН в России является работа О. В. Фельдмана с соавторами (Фельдман и др., 1998), в которой выполнена оценка эффективности агросистемы Центрально-Черноземного района за последние 200 лет. Анализируемый временной период характеризуется сменой применяемых в сельском хозяйстве технологий обработки пахотных земель, интенсификацией их распашки при одновременном сокращении площадей сенокосов и пастбищ. Это повлияло на смену структуры поступающих в систему потоков, поэтому увеличилась доля

приобретенных (закупленных) потоков и уменьшилась величина возобновляемых ресурсов. Эмергетическая эффективность растениеводства изменилась с 0.29 до 0.77, при этом увеличились затраты на единицу продукции. О. В. Фельдман делает вывод о том, что современные агросистемы при отсутствии вмешательства человека менее устойчивы в сравнении с доиндустриальными системами.

Далее, Б. В. Ларюшкин-Железный и И. А. Блохин (Ларюшкин-Железный, Блохин, 2008) впервые дали классификацию энергетическим методам и показали место в этой системе эмергетического анализа. Используя ЭМАН для расчета требуемой энергии на создание продуктов в сельском хозяйстве, авторы приходят к выводу, что на юге Российской Федерации целесообразно строительство оросительных систем, а на севере страны следует развивать животноводческий комплекс на основе увеличения местной кормовой базы.

В учебном пособии Н. В. Лисицына рассматриваются методы оценки функционирования крупных социо-экономико-экологических систем (Лисицын, 2010). В ряду энергетических методов рассмотрен и эмергетический анализ. Автор указывает, что ЭМАН строго базируется на физических началах и эмергия представляет собой энергию Гиббса солнечного излучения.

В Томске исследовательской группой А. В. Позднякова выполнен ряд работ, в которых намечается применение эмергетического анализа для оценки агроэкосистем (Поздняков, Шуркина, 2008), лесных экосистем (Иванова, 2002). В тезисах доклада М. Ю. Самуйленкова «Эмергетический подход к организации агроэкосистем» (Самуйленков, 2000) предложены русскоязычные эквиваленты терминов эмергетического анализа, приведены результаты О. В. Фельдмана и поставлена цель использовать их для создания модели сельскохозяйственного предприятия как саморегулирующейся агроэкосистемы. К сожалению, реализации автором поставленной задачи не последовало. В обзорной работе М. М. Ивановой (Иванова, 2002) вслед за М. Ю. Самуйленковым еще раз показывается несостоятельность оценки природных экосистем традиционными инструментами (стоимостной анализ) и раскрывается сущность эмергетического анализа. А. В. Поздняковым и К. А. Шуркиной применен эмергетический (без учета качества

энергии) анализ к хозяйству «СоМер-2» в Карагандинской области (Казахстан) (Поздняков, Шуркина, 2008). Переход на эмергетические единицы авторами не выполнен, т. к. они, вероятно, разделяют мнение А. С. Миндрин (Миндрин, 1997) о том, что заимствованные у Запада некоторые величины энергетических эквивалентов могут не соответствовать российским.

М. М. Ивановой заявлено о проведении эколого-энергетического анализа трех способов восстановления сосны на вырубках: посадкой сеянцев, посевом семян и естественным зарастанием (Иванова, 2009). В исследовании указывается, что природные потоки при трех системах восстановления оценены посредством эмергетического анализа Г. Одума. При этом в статье представлены лишь отдельные фрагменты ЭМАН изучаемых объектов. Приведены диаграмма поступающих в систему потоков на воссоздание 1 га сосны посевом семян и эмергетическая таблица по выращиванию 1 га сосны посевом семян. По двум другим способам лесовосстановления такие элементы не представлены. Финальные результаты ЭМАН – эмергетические индексы, на основании которых делаются заключения об устойчивости системы, степени ее истощительности и конкурентоспособности не приведены.

В диссертационной работе Т. Ш. Фузеллы (Фузелла, 2009) в очередной раз раскрыта сущность энергетического анализа, показаны его преимущества в сравнении со стоимостным анализом и использован этот вид анализа для оценки функционирования и оптимизации работы СПК «Нелюбино». Заявлено, что методологической базой диссертации выступают исследования Г. Одума по ЭМАН, но сама работа выполнена без учета качества энергии. ЭМАН требует перевода энергетических величин в эмергетические и вычисления соответствующих индексов, на основе которых будут сделаны выводы по эмергоэффективности, нагрузке на окружающую среду и устойчивости экономической системы.

Наибольшая доля исследовательских работ с использованием ЭМАН в РФ выполнена М. В. Фаминской, общее число публикаций которой более десятка. В работе (Фаминская, 2011) раскрывается сущность анализа, даются определения базовым понятиям, рассматриваются законы, лежащие в основе ЭМАН, а также указываются перспективы использования этого анализа в оценке това-

ров и услуг в экономике. Автор считает, что «подход Г. Одума является в каком-то смысле дополнительным к чисто экономическим подходам к качеству энергии: он применяет ту же методику «разложения на составляющие» энергетических потоков, но эти составляющие не экономические, а природные, к которым экономические подходы не могут подступиться». При проведении стоимостного и эмергетического исследований ценообразования на топливном рынке выявлена колоссальная (на порядок!) недооценка природных вложений в производстве топлива. Ряд работ (Фаминская, Потехина, 2011; Фаминская, 2013; Фаминская и др., 2017; Балтер и др., 2017) посвящен вопросам управления рисками для здоровья, обусловленными индустриальным загрязнением окружающей среды.

В последнее время в русскоязычной научной литературе появились работы, не только использующие ЭМАН, но и развивающие его инструментальную базу. Так, в продолжение подхода Вассалло и Му к оценке отходов производства и потребления О. С. Поляковой и С. Ю. Семеновым (Polyakova, Semenov, 2017, 2019) предложен эмергетический индекс для оценки экологической эффективности природозащитных предприятий, характеризующий снижение (увеличение) нагрузки на биосферу за счет создания и функционирования КОС. Природоохранная эффективность (EEE – emergy ecological efficiency) рассчитывается как отношение разницы между эмергетической оценкой предотвращаемого ущерба и нанесенного ущерба к предотвращаемому ущербу, выраженное в процентах:

$$EEE = \frac{ПУ - НУ}{ПУ} \cdot 100\% \quad (11)$$

где ПУ – предотвращаемый ущерб; НУ – нанесенный ущерб.

Предотвращаемый ущерб в самом грубом приближении – это природные услуги, которые поступают из окружающей среды на разбавление неочищенных стоков до предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющего вещества, по которому требуется наибольшее разбавление. При более точном расчете потребуются учитывать самоочищающуюся способность водного объекта, а в некоторых случаях и увеличение кормовой базы гидробиоценоза, а следовательно, и продуктивность экосистемы.

Нанесенный ущерб вычисляется как сумма амортизации канализационных очистных

сооружений, годовых затрат на функционирование, выраженных в эмджоулях, и эмергии чистой воды, требуемой для разбавления очищенных на КОС сточных вод до фоновых концентраций загрязняющих веществ в приемном водном объекте или нормативов для водных объектов определенной категории водопользования. Если предотвращаемый ущерб больше нанесенного, то экологическая эффективность положительна, и строительство КОС, использующих предложенную технологию, целесообразно. При наличии альтернатив выбирать следует технологию, имеющую наибольшую экологическую эффективность.

Таким образом, для эмергетической оценки КОС следует учитывать систему обращения с очищенными стоками. При их утилизации (на земледельческих полях орошения, в рыбоводных прудах и т. п.) эмергетический анализ следует выполнять с использованием в качестве базового параметра отношения эмергетического выхода (EYR), а в наиболее на сегодняшний день массовой практике – сброса очищенных стоков в природные водные объекты – природоохранную эффективность.

## Заключение

В предложенном варианте краткого изложения концепции и метода ЭМАН transformity – «степень трансформированности», в отличие от «трансформации», позволяет лучше понимать подход Г. Одума русскоязычному читателю и, следовательно, более широко использовать его в теории и практике защиты окружающей среды.

По мере развития ЭМАН происходит сближение по форме показателей эмергетического и стоимостного расчетов.

В классическом подходе Г. Одума отходы производства и потребления рассматриваются как рядовой элемент эмергетических потоков, утилизируемый в этой системе. Но в настоящее время отсутствуют технологии полной утилизации отходов и включения их в технологический или природный циклы, поэтому часть из них захоранивается, рассеивается, на что тратится дополнительная эмергия. При этом оказывается негативное воздействие на окружающую среду, «порча» природных экосистем. Поэтому отходы, систему обращения с ними и их влияние на окружающую среду необходимо учитывать при оценке функционирования (создания) объекта. Индекс экологической эмергетической эффективности (EEE) позволяет

оценить ущерб окружающей среде от строительства и функционирования природоохранного объекта и может быть полезным инструментом в обоснованиях при его проектировании.

В методологии эмергетического анализа отсутствует оценка замены одних экосистем другими. Поэтому дальнейшее развитие анализа должно включать разработку специального аппарата для такой оценки.

## Библиография

- Балтер Б. М., Фаминская М. В., Никитина Н. И., Романова Е. Ю., Яковлева Т. П., Подылин Н. Ю., Никишин И. Н. Теоретические и практические проблемы ноосферогенеза в условиях информатизации и глобализации современного общества. М.: РГСУ, 2017. 290 с.
- Булатов А. С. Экономика : Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. д-ра экон. наук проф. А. С. Булатова. М.: Экономистъ, 2004. 896 с.
- Иванова М. М. Эколого-энергетический анализ процессов восстановления лесов Томской области (на примере сосны обыкновенной) // Науки о Земле. 2009. № 4. С. 187–191.
- Иванова М. М. Энергетический анализ экосистем как один из аспектов их многокритериальной оценки // Проблемы устойчивого развития: иллюзии, реальность, прогноз: Материалы VI Всероссийского научного семинара «Самоорганизация устойчивых целостностей в природе и обществе». Томск: ТГУ, 2002. С. 143–147.
- Казаков В. Г., Луканин П. В., Смирнова О. С. Эксергетические методы оценки эффективности тепло-технологических установок: Учебное пособие. СПб.: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2013. 93 с.
- Ларюшкин-Железный Б. В., Блохин И. А. Эколого-энергетические методы: оценка эффективности использования природных ресурсов и величины техногенной нагрузки на окружающую среду // Инженерная экология. 2008. № 1. С. 29–39.
- Лисицын Н. В. Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения: Учебное пособие. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2010. 124 с.
- Миндрин А. С. Энергоэкономическая оценка сельскохозяйственной продукции. М.: ЦНИИМ, 1997. 294 с.
- Поздняков А. В., Шуркина К. А. Новый методологический подход к анализу функционирования агроэкосистем // Вестник ТГУ. 2008. № 316. С. 206–212.
- Самуйленков М. Ю. Эмергетический подход к организации агроэкосистем // Самоорганизация и организация власти: Материалы 4-го Всерос. науч. семинара. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. С. 162–164.
- Фаминская М. В. О циклической схеме управления риском для здоровья на основе экологического качества энергии // Российский государственный социальный университет. 2013. № 5. С. 92–98.
- Фаминская М. В., Балтер Д. Б., Балтер Б. М. Анализ возможности использовать показатель ущерба здоровью DALY в эмергетике // Моделирование информационных потоков, связанных с ноосферогенезом, глобализацией, индустриальным развитием, и их влияние на здоровье населения: Материалы II Международной научно-практической конференции: Сборник / Под науч. ред. Н. И. Никитиной. М., 2017. С. 174–183.
- Фаминская М. В., Потехина Е. В. Эмергия и экологическая иерархия качества энергии // Ученые записки Российского государственного социального университета. 2011. № 9 (97), ч. 1. С. 110–116.
- Фельдман О. В., Денисенко Е. А., Логофет Д. О. Эмергетический подход при оценке эффективности использования ресурсов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. М.: ВИНТИ, 1998. С. 66–81.
- Фузелла Т. Ш. Энергетический подход к определению эффективности и оптимизации функционирования агроэкосистем (на примере СПК «Нелюбино») : Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2009. 23 с.
- Andric I., Pina A., Ferrao P., Lacarriere B., Corre O. Le. On the performance of district heating systems in urban environment: an emergy approach // J. Clean. Prod. 2017. № 142. P. 109–120.
- Ayres R. U. Ecology vs. Economics: Confusing Production and Consumption. Center of the Management of Environmental Resources, INSEAD, Fontainebleau, France, 1988.
- Brown M. T., Herendeen R. A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view // Ecological Economics. 1996. № 19. P. 219–235.
- Bjorklund J., Geber U., Rydberg T. Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge // Resour. Conserv. Recycl. 2001. № 31. P. 293–316.
- Brown M. T., Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems // Ecological Modelling. 2004. № 178. P. 201–213.
- Campbell D. E., Garmestani A. S. An energy systems view of sustainability: emergy evaluation of the San Luis Basin, Colorado // Environ. Manag. 2012. № 95. P. 72–97.
- Chen B., Chen Z., Zhou Y., Zhou J., Chen G. et al. Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2009.

- № 14. P. 622–635.
- Chen G. Q., Chen B. Emergy-based energy and material metabolism of the Yellow River basin // *Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. № 14 (3). P. 923–934.
- Chen H., Chen G. Q., Ji X. Cosmic emergy based ecological systems model-ing // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2010. № 15. P. 2672–2700.
- Chen Z. M., Chen B., Chen G. Q. Cosmic emergy based ecological assessment for a wetland in Beijing // *Ecol. Model.* 2011. № 222 (2). P. 322–329.
- Cleveland C. J., Kaufmann R. K., Stern D. I. Aggregation and the role of energy in the economy // *Ecol. Econ.* 2000. № 32. P. 301–317.
- Duan N., Liu D., Dai J. et al. Evaluating the environmental impacts of an urban wetland park based on emergy accounting and life cycle assessment: a case study in Beijing // *Ecol. Model.* 2011. № 222 (2). P. 351–359.
- Fonseca C. R., Díaz-Delgado C., Esteller V., García-Pulid D. Geoinformatics tool with an emergy accounting approach for evaluating the sustainability of water systems: case study of the Lerma river, Mexico // *Ecol. Eng.* 2017. № 99. P. 436–453.
- Geber U., Bjorklund J. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems: a case study // *Ecol. Eng.* 2002. № 19. P. 97–117.
- Han M. Y., Shao L., Li J. S., Guo S., Meng J., Ahmad B., Hayat T., Alsaadi F., Chen G. Q. Emergy-based hybrid evaluation for commercial construction engineering: a case study in BDA // *Ecol. Indic.* 2014. № 47. P. 179–188.
- Hanfeng Mu, Xiao Feng, Khim Hoong Chu. Improved emergy indices for the evaluation of industrial systems incorporating waste management // *Ecological Engineering.* 2011. № 37. P. 335–342.
- Jiang M. M., Zhou J. B., Chen B., Yang Z., Ji F., Zhang L., Chen G. Q. Ecological evaluation of Beijing economy based on emergy indices // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. № 14. P. 2482–2494.
- Lei K., Wang Z., Ton S. Holistic emergy analysis of Macao // *Ecological Engineering.* 2008. № 32. P. 30–43.
- Lei K., Wang Z. Municipal wastes and their solar transformities: an emergy synthesis for Macao // *Waste Management.* 2008. № 28. P. 2522–2531.
- Lu H., Xu F. Emergy-based analysis of the energy security of China // *Energy.* 2019. № 181. P. 123–135.
- Lu H. F., Bai Y., Ren H., Campbell D. E. Integrated emergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvialpaddy-fields, implications for agricultural policy in China // *Environ. Manag.* 2010. № 91. P. 2727–2735.
- Mansson B. A., McGlade J. M. Ecology, thermodynamics and H. T. Odum's conjectures // *Oecologia.* 1993. № 93. P. 582–596.
- Nelson M., Odum H. T., Brown M. T., Alling A. "Living off the land": resource efficiency of wetland wastewater treatment // *Adv. Space Res.* 2001. Vol. 27 (9). P. 1547–1556.
- Odum H. T., Arding J. E. Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador. Report to Coastal Studies Institute, University of Rhode Island, Narragansett. Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, 1991. 114 p.
- Odum H. T., Odum E. C. Energy analysis overview of nation Working Paper WP-83-82. International Institute of Applied System Analysis, Laxenburg, Austria, 1983. 469 p.
- Odum H. T. *Emergy Systems Concepts and Self-Organization: A Rebuttal* // Springer. 1995. № 4. P. 518–522.
- Odum H. T. *Environment, Power, and Society*. NY: John Wiley, 1971. 336 p.
- Odum H. T. *Environmental accounting emergy and environmental decision making*. NY: Wiley, 1996. 370 p.
- Odum H. T. Self-organization, transformity and information // *Science.* 1988. № 25. P. 1132–1139.
- Paolo V., Chiara P., Mauro F. Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater // *Ecol. Eng.* 2009. № 35 (5). P. 687–694.
- Patterson M. Approaches to energy quality in energy analysis // *International Journal of global Energy Issues. Special Issue on Energy Analysis.* 1993. P. 19–28.
- Polyakova O. S., Semenov S. Y. Emergy analysis of wastewater treatment technology // *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences.* 2017. № 101. P. 784–791.
- Polyakova O. S., Semenov S. Yu. Reconstruction experience of the wastewater treatment plant (Kargasok village, Tomsk region, Russia) using "constructed wetlands" technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019. Vol. 400. P. 012020.
- Qin P., Wong Y. S., Tam N. F. Y. Emergy evaluation of Mai Po mangrove marshes // *Ecol. Eng.* 2000. № 16. P. 271–280.
- Spreng T. *Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems*. NY: Praeger Publishers, 1988. 289 p.
- Ulgiati S., Brown M. T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems // *Ecol. Model.* 1998. № 108. P. 23–36.
- Vassallo P., Paoli C. Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater // *Ecological engineering.* 2009. № 35. P. 687–694.
- Yang L., Kong F. L., Xi M., Li Y., Zi Y. Y. Emergy analysis of typical decen-tralized rural sewage treatment system: a case study of soil rapid infiltration in Qingdao, China // *Resour. Ecol.* 2016. № 7 (4). P. 309–316.

- Yang Z. F., Jiang M. M., Chen B., Zhou J. B., Chen G. Q., Li S. C. Solar energy evaluation for Chinese economy // *Energy Policy*. 2010. № 38 (2). P. 875–886.
- Yue J. S., Yuan X. Z., Li B., Ren Q., Wang X. F. Energy and exergy evaluation of a dike-pond project in the drawdown zone (DDZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) // *Ecol. Indic.* 2016. № 71. P. 248–257.
- Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education, 2015. 323 p.
- Wu X., Wu F., Tong X., Jiang B. Exergy-based sustainability assessment of an integrated production system of cattle, biogas, and greenhouse vegetables: insight into the comprehensive utilization of wastes on a large-scale farm in Northwest China // *Eng.* 2013. № 61. P. 335–344.
- Zhang D., Gersberg R. M., Zhang D., Keat T. S. Constructed wetlands in China // *Ecological Engineering*. 2009. № 35. P. 1367–1378.
- Zhang X. et al. Exergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges // *Resources, Conservation and Recycling*. 2010. № 55. P. 182–195.
- Zuo P., Wan S. W., Qin P., Du J. J., Wang H. A comparison of the sustainability of original and constructed wetlands in Yancheng Biosphere Reserve, China: implications from exergy evaluation // *Environmental Science & Policy*. 2004. № 7. P. 329–343.

## **Благодарности**

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0721-2020-0019).

Выражаю искреннюю благодарность коллективу лаборатории экологии, генетики и охраны окружающей среды НИИ биологии и биофизики Томского государственного университета за помощь в написании статьи, за конструктивную критику и ценные советы.

# EMERGETIC ANALYSIS AND EXPERIENCE OF ITS USE FOR THE ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC AND NATURAL SYSTEMS

**POLYAKOVA**  
Oksana Sergeevna

*National Research Tomsk State University, oksanochka84@list.ru*

**SEMENOV**  
Sergey Yurevich

*PhD, Tomsk State University, p9138009960@gmail.com*

## Keywords:

exergy  
emergy  
sewage treatment  
facilities  
environmental  
engineering  
ecological effect

**Summary:** The article deals with the issues of foundations and development of emergetic analysis (EMAN), the conceptual framework and methods for calculating the main emergetic indicators. An «emergy» is the amount of exergy of one type that is directly or indirectly necessary to maintain a process or store energy of another type or substance. As the system becomes more complex, the amount of energy contained in the object (service) decreases, and the degree of its transformation increases. The emergy is measured in solar units, which can be estimated using three different emergy units – the degree of transformation, specific emergy and emergy of the monetary unit. In published Russian-language works, the term «transformation» is used as the equivalent of the English term transformity. More adequate is the term «degree of transformation», which combines transformation, specific emergy and emergy of money. G. Odum's approach to the assessment of enterprises for the protection of the environment from pollution is based on the understanding of wastewater as a highly valuable resource. But, in the absence of cost-effective technologies for returning waste to production cycles, wastewater, for example, is now mostly neutralized, rather than disposed of. The purpose of the creation and operation of sewage treatment plants is currently to reduce environmental pollution. A number of researchers (Vassalo, Zuo, Chen) include ecosystem expenses for neutralizing the negative impact of the generated waste in the emergetic cost of operating a conservation facility. Polyakova and Semenov proposed an emergetic index for assessing the environmental efficiency of nature protection enterprises, which characterizes a reduction (increase) of the load on the biosphere due to the creation and operation of sewage treatment plants. In the methodology of emergetic analysis, there is no assessment of some ecosystems by others. Therefore, further development of the analysis should include the development of a special apparatus for such an assessment.

**Reviewer:** A. V. Pozdnyakov

**Received on:** 03 December 2020

**Published on:** 15 June 2021

## References

- Andric I., Pina A., Ferrao P., Lacarriere B., Corre O. Le. On the performance of district heating systems in urban environment: an emergy approach, *J. Clean. Prod.* 2017. No. 142. P. 109–120.
- Ayres R. U. *Ecology vs. Economics: Confusing Production and Consumption*. Center of the Management of Environmental Resources, INSEAD, Fontainebleau, France. 1988.
- Balter B. M., Faminskaya M. V., Nikitina N. I., Romanova E. Yu., Yakovleva T. P., Podylin N. Yu., Nikishin I. N. *Theoretical and practical problems of noospherogenesis in the conditions of informatization and globalization of modern society*. M.: RGSU, 2017. 290 p.
- Bjorklund J., Geber U., Rydberg T. Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge, *Resour. Conserv. Recycl.* 2001. No. 31. P. 293–316.
- Brown M. T., Herendeen R. A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view, *Ecological Economics*. 1996. No. 19. P. 219–235.
- Brown M. T., Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems, *Ecological Modelling*. 2004. No. 178. P. 201–213.
- Bulatov A. S. *Economics: Uchebnik*. 3-e izd., pererab. i dop., Pod red. d-ra ekon. nauk prof. A. P. Bulatova.



- M.: *Ekonomist'*, 2004. 896 p.
- Campbell D. E., Garmestani A. S. An energy systems view of sustainability: emergy evaluation of the San Luis Basin, Colorado, *Environ. Manag.* 2012. No. 95. P. 72–97.
- Chen B., Chen Z., Zhou Y., Zhou J., Chen G. et al. Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. No. 14. P. 622–635.
- Chen G. Q., Chen B. Emergy-based energy and material metabolism of the Yellow River basin, *Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. No. 14 (3). P. 923–934.
- Chen H., Chen G. Q., Ji X. Cosmic emergy based ecological systems modeling, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2010. No. 15. P. 2672–2700.
- Chen Z. M., Chen B., Chen G. Q. Cosmic exergy based ecological assessment for a wetland in Beijing, *Ecol. Model.* 2011. No. 222 (2). P. 322–329.
- Cleveland C. J., Kaufmann R. K., Stern D. I. Aggregation and the role of energy in the economy, *Ecol. Econ.* 2000. No. 32. P. 301–317.
- Duan N., Liu D., Dai J. et al. Evaluating the environmental impacts of an urban wetland park based on emergy accounting and life cycle assessment: a case study in Beijing, *Ecol. Model.* 2011. No. 222 (2). P. 351–359.
- Faminskaya M. V. Balter D. B. Balter B. M. Analysis of the possibility of using the health damage indicator DALI in energetics, *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii: Sbornik, Pod nauch. red. N. I. Nikitinoy*. 2017. P. 174–183.
- Faminskaya M. V. Potehina E. V. Emergy and environmental hierarchy of energy quality, *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo social'nogo universiteta*. 2011. No. 9 (97), ch. 1. P. 110–116.
- Faminskaya M. V. On the cyclical scheme of health risk management on the basis of the environmental quality of energy, *Rossiyskiy gosudarstvennyy social'nyy universitet*. 2013. No. 5. P. 92–98.
- Fel'dman O. V. Denisenko E. A. Logofet D. O. Emergy approach to the assessment of the of resource efficiency, *Problemy okruzhayushey sredy i prirodnyh resursov*. M.: VINITI, 1998. P. 66–81.
- Fonseca C. R., Díaz-Delgado C., Esteller V., García-Pulid D. Geoinformatics tool with an emergy accounting approach for evaluating the sustainability of water systems: case study of the Lerma river, Mexico, *Ecol. Eng.* 2017. No. 99. P. 436–453.
- Fuzella T. Sh. Emergy approach to determining the efficiency and optimization of the functioning agroecosystems (on the example of SPK Nelubino): *Avtoref. dip. ... kand. geogr. nauk*. Tomsk, 2009. 23 p.
- Geber U., Bjorklund J. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems: a case study, *Ecol. Eng.* 2002. No. 19. P. 97-
- Han M. Y., Shao L., Li J. S., Guo S., Meng J., Ahmad B., Hayat T., Alsaadi F., Chen G. Q. Emergy-based hybrid evaluation for commercial construction engineering: a case study in BDA, *Ecol. Indic.* 2014. No. 47. P. 179–188.
- Hanfeng Mu, Xiao Feng, Khim Hoong Chu. Improved emergy indices for the evaluation of industrial systems incorporating waste management, *Ecological Engineering*. 2011. No. 37. P. 335–342.
- Ivanova M. M. Energy analysis of ecosystems as one of the aspects of their multi-criteria assessment, *Problemy ustoychivogo razvitiya: illyuzii, real'nost', prognoz: Materialy VI Vserossiyskogo nauchnogo seminaru «Samoorganizaciya ustoychivyh celostnostey v prirode i obschestve»*. Tomsk: TGU, 2002. P. 143–147.
- Ivanova M. M. Environmental and energy analysis of the processes of forest restoration in the Tomsk oblast (on the example of common pine, *Nauki o Zemle*. 2009. No. 4. P. 187–191.
- Jiang M. M., Zhou J. B., Chen B., Yang Z., Ji F., Zhang L., Chen G. Q. Ecological evaluation of Beijing economy based on emergy indices, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. No. 14. P. 2482–2494.
- Kazakov V. G. Lukanin P. V. Smirnova O. S. Exergy methods of assessment of effectiveness of heat technology plants: Study guide. SPb.: Nacional'nyy issledovatel'skiy universitet «MEI», 2013. 93 p.
- Lei K., Wang Z. Municipal wastes and their solar transformities: an emergy synthesis for Macao, *Waste Management*. 2008. No. 28. P. 2522–2531.
- Lei K., Wang Z., Ton S. Holistic emergy analysis of Macao, *Ecological Engineering*. 2008. No. 32. P. 30–43.
- Lisicyn N. V. Theoretical foundations of energy and resource conservation: Study guide. SPb.: SPbGTI(TU), 2010. 124 p.
- Lu H. F., Bai Y., Ren H., Campbell D. E. Integrated emergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvialpaddy-fields, implications for agricultural policy in China , *Environ. Manag.* 2010. No. 91. P. 2727–2735.
- Lu H., Xu F. Emergy-based analysis of the energy security of China, *Energy*. 2019. No. 181. P. 123–135.
- Mansson B. A., McGlade J. M. Ecology, thermodynamics and H. T. Odum's conjectures, *Oecologia*. 1993. No. 93. P. 582–596.
- Mindrin A. S. Energy-economic assessment of agricultural products. M.: CNIIM, 1997. 294 p.
- Nelson M., Odum H. T., Brown M. T., Alling A. "Living off the land": resource efficiency of wetland

- wastewater treatment, *Adv. Space Res.* 2001. Vol. 27 (9). P. 1547–1556.
- Odum H. T. *Energy Systems Concepts and Self-Organization: A Rebuttal*, Springer. 1995. No. 4. P. 518–522.
- Odum H. T. *Environment, Power, and Society*. NY: John Wiley, 1971. 336 p.
- Odum H. T. *Environmental accounting energy and environmental decision making*. NY: Wiley, 1996. 370 p.
- Odum H. T. *Self-organization, transformity and information, Science*. 1988. No. 25. P. 1132–1139.
- Odum H. T., Arding J. E. *Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador*. Report to Coastal Studies Institute, University of Rhode Island, Narragansett. Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, 1991. P. 87.
- Odum H. T., Odum E. C. *Energy analysis overview of nation Working Paper WP-83-82*. International Institute of Applied System Analysis, Laxenburg, Austria, 1983. 469 p.
- Paolo V., Chiara P., Mauro F. *Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater, Ecol. Eng.* 2009. No. 35 (5). P. 687–694.
- Patterson M. *Approaches to energy quality in energy analysis, International Journal of global Energy Issues. Special Issue on Energy Analysis*. 1993. P. 19–28.
- Polyakova O. S., Semenov S. Y. *Emergy analysis of wastewater treatment technology, The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences*. 2017. No. 101. P. 784–791.
- Polyakova O. S., Semenov S. Yu. *Reconstruction experience of the wastewater treatment plant (Kargasok village, Tomsk region, Russia) using «constructed wetlands» technology, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. STR??
- Pozdnyakov A. V., Shurkina K. A. *New methodological approach to the analysis of agroecosystem functioning, Vestnik TGU*. 2008. No. 316. P. 206–212.
- Qin P., Wong Y. S., Tam N. F. Y. *Emergy evaluation of Mai Po mangrove marshes, Ecol. Eng.* 2000. No. 16. P. 271–280.
- Samuylenkov M. Yu. *Emergy approach to the organization of agroecosystems, Samoorganizaciya i organizaciya vlasti: Materialy 4-go Vserop. nauch. seminaru. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN*, 2000. P. 162–164.
- Spreng T. *Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems*. NY: Praeger Publishers, 1988. 289 p.
- Ulgjati S., Brown M. T. *Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems, Ecol. Model.* 1998. No. 108. P. 23–36.
- Vassallo P., Paoli C. *Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater, Ecological engineering*. 2009. No. 35. P. 687–694.
- Wu X., Wu F., Tong X., Jiang B. *Emergy-based sustainability assessment of an integrated production system of cattle, biogas, and greenhouse vegetables: insight into the comprehensive utilization of wastes on a large-scale farm in Northwest China, Eng.* 2013. No. 61. P. 335–344.
- Yang L., Kong F. L., Xi M., Li Y., Zi Y. Y. *Emergy analysis of typical decen-tralized rural sewage treatment system: a case study of soil rapid infiltration in Qingdao, China, Resour. Ecol.* 2016. No. 7 (4). P. 309–316.
- Yang Z. F., Jiang M. M., Chen B., Zhou J. B., Chen G. Q., Li S. C. *Solar emergy evaluation for Chinese economy, Energy Policy*. 2010. No. 38 (2). P. 875–886.
- Yue J. S., Yuan X. Z., Li B., Ren Q., Wang X. F. *Emergy and exergy evaluation of a dike-pond project in the drawdown zone (DDZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR), Ecol. Indic.* 2016. No. 71. P. 248–257.
- Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education, 2015. 323 p.
- Zhang D., Gersberg R. M., Zhang D., Keat T. S. *Constructed wetlands in China, Ecological Engineering*. 2009. No. 35. P. 1367–1378.
- Zhang X. et al. *Emergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges, Resources, Conservation and Recycling*. 2010. No. 55. P. 182–195.
- Zheleznyy B. V., Blohin I. A. *Environmental and energy methods: assessment of the effectiveness of using natural resources and the value of man-made burden on the environment, Inzhenernaya ekologiya*. 2008. No. 1. P. 29–39.
- Zuo P., Wan S. W., Qin P., Du J. J., Wang H. *A comparison of the sustainability of original and constructed wetlands in Yancheng Biosphere Reserve, China: implications from emergy evaluation, Environmental Science & Policy*. 2004. No. 7. P. 329–343.