

УДК 614.841.411

Удавцова Е. Ю., канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
Кондашов А. А., канд. физ-мат. наук, ведущий научный сотрудник
Бобринев Е. В., канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ
ВНИИПО МЧС России

Udavtsova EYu, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher
Kondashov AA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Researcher
Bobrinev EV, PhD. Biol. sciences, Leading Researcher
FGBU VNIPO EMERCOM of Russia

**АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТАМ ИНДЕКСА
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ****ANALYSIS OF APPROACHES TO CALCULATING THE
ENVIRONMENTAL SAFETY INDEX**

Сущность устойчивого развития, провозглашенная ООН в 1987 г., определена как сохранение окружающей среды, природных ресурсов для будущих поколений. На основе этого доклада была сформулирована «классическая триада устойчивого развития», согласно которой устойчивость является точкой пересечения трех основных измерений: экологии, экономики и общества. Конкретные цели устойчивого развития были сформулированы только в 2015 г., что позволило определить 17 целей [3].

Исследователями выявлены три ключевые проблемы реализации концепции устойчивого развития: отсутствие единой методики оценки показателей устойчивого развития; несбалансированность показателей как по составляющим (экологическое, социальное, управленческое развитие), так и в составе каждой составляющей; отсутствие отчетности финансовых показателей, что не позволяет оценивать возможности устойчивого развития, которое требует значительной финансовой поддержки [3].

В процессе развития организационных систем происходит одновременно структурирование и развитие среды путём внесения в неё определённого порядка. Такой порядок в данном случае можно рассматривать как определяющую предпосылку обеспечения устойчивости определённых ориентированных элементов среды, одним из элементов которой является социальная система.

Социальная система – это организационно-динамическая система, создаваемая людьми для достижения определённых целей. Такие системы тесно связаны с окружающей средой. Они как бы вырастают из неё,

функционируют в ней, а результаты этого функционирования, в свою очередь, изменяют окружающую среду. Конфликт между социально-экономическим развитием и экологической защитой окружающей среды представляет собой серьёзную проблему для достижения устойчивого развития. Основное противоречие современного общества – узкопрагматическое отношение бизнеса к природе как к неисчерпаемому источнику ресурсов и неспособность государственных органов и общественности сохранить природную среду обитания для будущих поколений [14].

Внедрение междисциплинарных подходов, объединяющих социальные, экономические и экологические аспекты, позволит более полно понять взаимосвязь между этими аспектами. В настоящее время экологическое знание позволяет обеспечить экономический баланс между хозяйственной деятельностью людей и качественным состоянием природы [13].

Экологическая безопасность является важнейшим показателем для оценки устойчивого развития региона. Целью большинства исследований в этой области является создание оптимизированной системы для расчета индекса экологической безопасности и определения экологических коридоров с помощью модели минимально ограниченных ресурсов [1].

Существует множество фундаментальных и теоретических работ по созданию таких систем, с основными подходами к моделированию, в частности:

- модель «давление-состояние-реакция» (PSR) [7];
- нечеткая модель оценки [10];
- модель экологического следа [8];
- модель искусственной нейронной сети [2, 11];
- анализа оболочек данных (DEA) [4];
- измерения на основе нежелательного результата (SBM) [6];
- анализа главных компонентов (PCA) [12];
- аналитический иерархический процесс (АНП) [10, 12];
- метод упорядочения предпочтений по сходству с идеальным решением (TOPSIS) [9];
- метод организации ранжирования предпочтений для оценки обогащения (PROMETHEE) [9];
- метод нечеткой аналитической иерархии (FАНП) [5] и ряд других моделей.

Описание наиболее часто используемых из этих моделей приведены ниже.

Модель PSR была предложена Агентством экономического сотрудничества и развития ООН в конце 1980-х годов. Он делит систему индикаторов оценки на три подсистемы давления-состояния-реакции, каждая из которых содержит различные типы индикаторов. Модель

фокусируется на воздействии человека на окружающую среду, отражает взаимосвязь между природной системой, экологической системой и социальной системой и систематически отражает механизм процесса оценки экологической безопасности [7].

Так называемый экологический след обычно относится к экологическому региональному пространству, которое удовлетворяет потребности определенного количества людей с определенным качеством жизни. В этом пространстве есть ресурсы для использования человеком и окружающая среда, на которую они полагаются, и оно может поглощать отходы и выбросы. Понятиями, тесно связанными с экологическим следом, являются экологический дефицит (или экологический избыток) и экологическая пропускная способность. Первый в основном используется для оценки устойчивости регионального экономического и социального развития путем сравнения ресурсного и экологического воздействия, потребляемого предприятиями и жителями определенного региона, с потенциалом природных ресурсов и экологической средой в этом регионе. С этой точки зрения, несущая способность окружающей среды может рассматриваться как ресурсный потенциал региона, в то время как экологический дефицит - это ситуация, когда величина экологического следа превышает величину экологической несущей способности, а перспективы устойчивого развития региона вызывают тревогу. Напротив, если потребление ресурсов и воздействие на окружающую среду производства и жизни предприятий и жителей региона находятся в пределах допустимого, в целом экологическая среда, экономика и общество региона находятся в состоянии устойчивого развития. В то время как развитие промышленности способствует экономическому росту и регионально скоординированному развитию, неизбежно возникает давление на экологическую среду и природные ресурсы [8].

Области применения искусственных нейронных сетей (ИНС) непрерывно развивались и расширялись в последние годы благодаря непрерывному развитию компьютерных технологий и искусственного интеллекта. ИНС получили широкое распространение и применение на практике в связи с растущей обеспокоенностью по поводу экологических проблем, как глобальное потепление и аномалии атмосферной циркуляции. Однако ИНС относительно точны при использовании для краткосрочных прогнозов, несмотря на то, что в исследованиях глобального изменения климата предпочтение отдается эффектам взаимодействий в качестве основы для изучения и долгосрочным экспериментальным исследованиям. ИНС остаются лучшим выбором, чем многие традиционные методы, при решении нелинейных задач и обладают большим потенциалом для изучения глобального изменения климата и экологических проблем. ИНС способны решать задачи, которые не под силу другим методам. Это особенно

актуально в ситуациях, когда измерения проводить сложно или когда доступны лишь неполные данные [2].

Ожидается, что ИНС получат широкое распространение и дальнейшее развитие для исследований глобального изменения климата и экологии. Искусственные нейронные сети включают в себя три основных элемента обработки: блок, топологию сети и правила обучения. Блок обработки ИНС является базовым операционным блоком. Он имитирует функции нейронов. Блок обработки имеет несколько входных и выходных путей. Роль передачи информации заключается в поступлении на порты, а выходы передают информацию от одного блока обработки к другому. Топология сети определяет маршрут и способ передачи информации между каждым процессором и слоем. В настоящее время доступны десятки топологий нейронных сетей. Выходное значение затем получается с помощью функции преобразования. Наконец, результат классификации присваивает максимальную весовую категорию для категории владения входными данными [11].

РСА — это метод, позволяющий уменьшить размерность наборов данных и улучшить интерпретируемость, одновременно минимизируя потери информации. Это достигается за счёт создания новых некоррелированных переменных, последовательно максимизирующих дисперсию. Нахождение таких новых переменных, главных компонент, сводится к решению задачи нахождения собственных значений и собственных векторов. В работе [12] исследовании РСА проводится на основе таких экологических факторов окружающей среды, как температура воздуха, осадки, содержание твердых частиц в атмосфере, концентрация тропосферного NO_2 .

АНР – это многокритериальный и многоцелевой метод принятия решений, который сочетает в себе качественный и количественный анализ и особенно применим к проблемам, которые трудно полностью оценить количественно. Иерархические отношения комплексной системы оценочных факторов представлены могут быть представлены в виде матрицы суждений [12]. В работе [10] комплексная система оценочных факторов имеет иерархическую структуру и очень подходит для анализа с использованием метода АНР. Для построения матрицы сравниваются факторы на одинаковом уровне, и эксперты оценивают важность этих факторов по 9-балльной шкале. Авторами была построена иерархическая система показателей оценки, в которой общая цель системы оценки представлена символом А, а общая цель дополнительно разделена на две подцели, включая экологическую устойчивость (А1) и экологическое давление (А2). Цель А1 далее делится на четыре критерийных слоя, включая эрозию почвы, почвенный покров, геологические катастрофы и климатические факторы. Цель А2 далее делится на три критерий-слоя, включая демографическую нагрузку, социально-экономическое давление и

ресурсно-экологическая нагрузка. На этой основе были выбраны пятнадцать основных показателей следующим образом: наклон, землепользование, индекс напряжения земли, индекс качества среды обитания, индекс плотности водной сети, растительный покров, индекс геологической опасности, годовое количество осадков, годовая общая температура, индекс плотности населения, доля земли под застройку, индекс экономического развития, индекс плотности дорожной сети, коэффициент рекультивации и доля сельскохозяйственных угодий.

Следует отметить, что многофакторность и многокритериальность понятия социальной (экономической, экологической) безопасности обуславливают возможные подходы к её оценке методами экономической кибернетики. Одним из них является интегральный метод оценки, включающий решение следующих вопросов: формы интегрального показателя, нормировки показателей и весовых коэффициентов. При этом интегральная оценка уровня безопасности (социальной, экономической, экологической) априори предполагает сравнение с допустимыми пороговыми значениями, что предопределяет решение другой задачи: определения границ безопасного существования системы, т.е. вектора пороговых значений.

Использование аддитивной свертки не является оптимальным, при нулевых или низких значениях некоторых показателей оно подвержено высокому уровню интегрального индекса. Мультипликативная (нелинейная) форма интегрального индекса считается более предпочтительной. Кроме того, веса предполагаются одинаковыми для всех показателей, что не соответствует действительности, либо, в иных случаях, назначаются экспертно. Указанный подход вносит значительную долю субъективизма и не исключает принципиальных ошибок. Следовательно, существует очевидная потребность в формализованных методах обоснования весовых коэффициентов. Кроме того, постоянство весовых коэффициентов является ещё одним недостатком. Более того, существенные изменения экологической ситуации со временем приводят к кардинальным изменениям эмпирических оценок зависимостей. Это, в свою очередь, влечет за собой изменение весовых коэффициентов. Поэтому возникает потребность в методах обоснования динамических весовых коэффициентов.

Необходимо также отметить, что формулирование интегральных показателей без сопоставления с пороговыми значениями интегрального показателя совершенно бессмысленно, поскольку показывает лишь его уменьшение или увеличение в определенные периоды и может привести к выводу о максимизации интегрального показателя, что будет ошибочным с точки зрения прикладной теории систем.

Оценки экологической безопасности должны следовать определённым принципам. Во-первых, они должны поддерживать баланс между экологическим спросом и предложением. Во-вторых, метод должен

обеспечивать осуществимые, масштабируемые и точные оценки. В-третьих, индикаторы должны отражать экологическую безопасность с разных точек зрения. Важными проблемами, требующими решения, являются совершенствование систем мониторинга экологического состояния, рациональное планирование городского строительства и своевременное и эффективное управление устойчивым развитием.

Список литературы

1. A methodological study on the identification of ecological security change processes and zoning control strategies – Based on the perspective of sustainable development / Y. Li, K. Hou, Y. Chang et al. // *Science of The Total Environment*. 2024. V. 946. – P. 174190-174205. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174190>.
2. Application of artificial neural networks in global climate change and ecological research: an overview / Z. Liu, C. Peng, W. Xiang et al. // *Chin. Sci. Bull.* 2010. V. 55, – P. 3853–3863. doi:10.1007/s11434-010-4183-3
3. Balancing urban expansion with a focus on ecological security: A case study of Zhaotong City, China / Y. Hu, Yu Li, Yi. Li et al. // *Ecological Indicators*. 2023. V. 156. – P. 111105-111130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111105>.
4. Ecological security assessment for megacities in the Yangtze River basin: applying improved energy-ecological footprint and DEASBM model / Y. Liu, Y. Qu, Y. Cang, X. Ding // *Ecol. Indic.* 2022. V. 134. – P. 108481. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108481>
5. Ecological vulnerability assessment based on fuzzy analytical method and analytic hierarchy process in Yellow River Delta / C. Wu, G. Liu, C. Huang et al. // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018. V. 15. № 5. – P. 855-868. doi: 10.3390/ijerph15050855
6. Estimation of remote sensing based ecological index along the Grand Canal based on PCA-AHP-TOPSIS methodology / Y. Li, L. Wu, Q. Han et al. // *Ecol. Indic.* 2021. V. 122. – P. 107214. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107214>
7. Evaluation of ecological security and ecological maintenance based on pressure-state-response (PSR) model, case study: Fuzhou city, China / S. Lai, J. Sha, A. Eladawy et al. // *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* 2022. V. 28. № 7. – P. 734-761. doi:10.1080/10807039.2022.2081835
8. Li, D. Measurement and analysis of ecological pressure due to industrial development in the Yangtze River economic belt from 2010 to 2018. / D. Li, J. Zhang // *J. Clean. Prod.* 2022. V. 353. – P. 131614-131628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131614>
9. Water and Environmental Resources: A Multi-Criteria Assessment of Management Approaches / F. Armas Vargas, L.F. Nava, E. Gómez Reyes et al. // *Water*. 2023. V. 15. – P. 2991-3024. <https://doi.org/10.3390/w15162991>

10. Wu, X. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method / X. Wu, F. Hu // *Ecol. Indic.* 2020. V. 113. – P. 106243-106255. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106243>

11. Xiu, L. N. Current status and future direction of the study on artificial neural network classification processing in remote sensing (in Chinese) / L. N. Xiu, X. N. Liu // *Remote Sens Technol Appl.* 2003. V. 18. – P. 339–345. <https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2003.5.339>

12. Zhou, J.-L., Xu, Q.-Q., Zhang, X.-Y., Water resources and sustainability assessment based on group AHP-PCA method: a case study in the Jinsha River basin / J.-L. Zhou, Q.-Q. Xu, X.-Y. Zhang // *Water.* 2018. V. 10. № 12. – P. 1880.

13. Доронина, М. В. О проблеме экологизации экономического знания / М. В. Доронина // *Агропродовольственная политика России.* – 2015. – № 11(47). – С. 71-73.

14. Хафизова, К. Н. Конфликт экономики и экологии: проблемы и пути решения / К. Н. Хафизова // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность.* – 2012. – Т. 8, № 11(152). – С. 38-46.

References

1. A methodological study on the identification of ecological security change processes and zoning control strategies – Based on the perspective of sustainable development / Y. Li, K. Hou, Y. Chang et al. // *Science of The Total Environment.* 2024. V. 946. – P. 174190-174205. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174190>.

2. Application of artificial neural networks in global climate change and ecological research: an overview / Z. Liu, C. Peng, W. Xiang et al. // *Chin. Sci. Bull.* 2010. V. 55, – P. 3853–3863. doi:10.1007/s11434-010-4183-3

3. Balancing urban expansion with a focus on ecological security: A case study of Zhaotong City, China / Y. Hu, Yu Li, Yi. Li et al. // *Ecological Indicators.* 2023. V. 156. – P. 111105-111130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111105>.

4. Ecological security assessment for megacities in the Yangtze River basin: applying improved energy-ecological footprint and DEASBM model / Y. Liu, Y. Qu, Y. Cang, X. Ding // *Ecol. Indic.* 2022. V. 134. – P. 108481. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108481>

5. Ecological vulnerability assessment based on fuzzy analytical method and analytic hierarchy process in Yellow River Delta / C. Wu, G. Liu, C. Huang et al. // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2018. V. 15. № 5. – P. 855-868. doi: 10.3390/ijerph15050855

6. Estimation of remote sensing based ecological index along the Grand Canal based on PCA-AHP-TOPSIS methodology / Y. Li, L. Wu, Q. Han et al.

//Ecol. Indic. 2021. V. 122. – P. 107214.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107214>

7. Evaluation of ecological security and ecological maintenance based on pressure-state-response (PSR) model, case study: Fuzhou city, China / S. Lai, J. Sha, A. Eladawy et al. // Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J. 2022. V. 28. № 7. – P. 734-761. doi:10.1080/10807039.2022.2081835

8. Li, D. Measurement and analysis of ecological pressure due to industrial development in the Yangtze River economic belt from 2010 to 2018. / D. Li, J. Zhang // J. Clean. Prod. 2022. V. 353. – P. 131614-131628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131614>

9. Water and Environmental Resources: A Multi-Criteria Assessment of Management Approaches / F. Armas Vargas, L.F. Nava, E. Gómez Reyes et al. // Water. 2023. V. 15. – P. 2991-3024. <https://doi.org/10.3390/w15162991>

10. Wu, X. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method / X. Wu, F. Hu // Ecol. Indic. 2020. V. 113. – P. 106243-106255. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106243>

11. Xiu, L. N. Current status and future direction of the study on artificial neural network classification processing in remote sensing (in Chinese) / L. N. Xiu, X. N. Liu // Remote Sens Technol Appl. 2003. V. 18. – P. 339–345. <https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2003.5.339>

12. Zhou, J.-L., Xu, Q.-Q., Zhang, X.-Y., Water resources and sustainability assessment based on group AHP-PCA method: a case study in the Jinsha River basin / J.-L. Zhou, Q.-Q. Xu, X.-Y. Zhang // Water. 2018. V. 10. № 12. – P. 1880.

13. Doronina, M. V. On the problem of ecologization of economic knowledge / M. V. Doronina // Agricultural and food policy of Russia. – 2015. – № 11(47). – Pp. 71-73.

14. Khafizova, K. N. The conflict of economics and ecology: problems and solutions / K. N. Khafizova // National interests: priorities and security. - 2012. – Vol. 8, No. 11(152). – pp. 38-46.