

Многокритериальная оценка вовлечения возобновляемых источников энергии в энергосистему региона на основе метода анализа иерархий

Виктория В. Бучацкая

Адыгейский государственный
университет
strateg_r@adygnet.ru

Стефан В. Онищенко

Адыгейский государственный
университет
osv@adygnet.ru

Павел Ю. Бучацкий

Адыгейский государственный
университет
buch@adygnet.ru

Семён В. Теплоухов

Адыгейский государственный
университет
tepl_sv@adygnet.ru

Аннотация. Эффективная интеграция ресурсов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетические системы требует комплексного анализа их преимуществ и ограничений, для чего могут использоваться различные методы, позволяющие определить количество доступных для вовлечения энергетических ресурсов в конкретной географической области. При определении возможности вовлечения ВИЭ на уровне региона, возникает вопрос поиска наиболее эффективных из доступных источников. Для этого необходимо использовать систему критериев, позволяющую с учетом различных аспектов оценить эффективность интеграции конкретных энергетических ресурсов. Реализован программный модуль многокритериальной оценки ресурсов возобновляемых источников энергии с использованием языка программирования Python, основанный на использовании группы критериев. Проведено первоначальное ранжирование значимости рассматриваемых критериев с использованием экспертных оценок, метода парного сравнения и метода анализа иерархий (АИР). В дальнейшем производится оценка имеющихся альтернатив на примере республики Адыгея, для выбора наиболее релевантных видов ВИЭ в зависимости от климатических и географических условий. Разработанный программный модуль является частью подсистемы управления знаниями, входящей в состав информационно-аналитической системы оценки решений в возобновляемой энергетике.

Ключевые слова: принятие решений; возобновляемая энергия; критерии оценки; энергетические альтернативы, метод анализа иерархий

1. ВВЕДЕНИЕ

Возобновляемые источники энергии в настоящий момент являются одним из основных инструментов реализации политики энергетической трансформации и перехода к углеродно-нейтральной энергетике [1], что приводит к ежегодному росту их доли в общем объеме генерации энергии. На рис. 1 представлены объемы

генерации энергии от различных видов возобновляемой энергии за 2023–2024 годы с прогнозом до 2030 года (аналитика агентства IEA – International Energy Agency) [2].

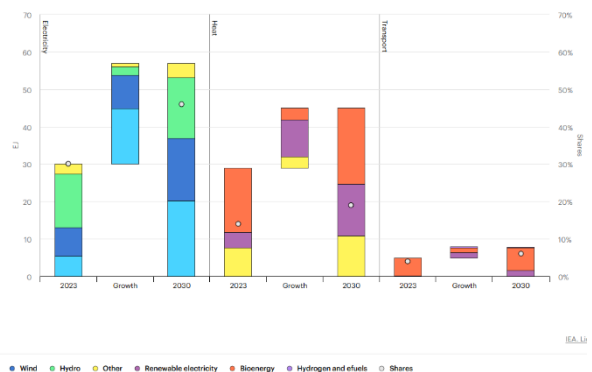


Рис. 1. Рост спроса на возобновляемую энергию по секторам, 2023–2030

Распространение возобновляемых источников энергии обусловлено различными факторами, ключевыми из которых является более широкое распространение и гораздо меньший выброс парников газов в сравнении с традиционными углеводородными ресурсами [3]. Однако процесс их интеграции является не простой задачей, важным этапом в решении которой является определение эффективности использования того или иного источника энергии в исследуемом регионе для чего недостаточно только лишь сведений о его теоретическом и техническом потенциале [4], [5], [6], так как в данном случае не учитываются такие аспекты как стоимости технологии преобразования, затраты на построение комплекса, влияние на экологию и пр.

Ранее была представлена концепция информационно-аналитической системы оценки решений в возобновляемой энергетике [7], состоящей из нескольких подсистем, позволяющих осуществить

комплексную оценку ресурсов возобновляемой энергии на различных уровнях масштабирования. Одно из важных мест в указанной системе отведено подсистеме управления знаниями, отвечающей за применение интеллектуальных методов прогнозирования и оценки энергетического потенциала, снижение степени неопределенности входной информации, организацию взаимодействия с экспертами и реализацию методов, используемых для расчета эффективности интеграции энергетического ресурса и определения наиболее оптимальной конфигурации энергокомплекса, состоящего из нескольких различных технологий преобразования. Отдельным этапом, реализуемым в процессе разработки системы управления знаниями, можно определить процедуру многокритериальной оценки для определения наиболее оптимальной конфигурации энергетической системы [8].

Для решения задачи критериальной оценки ресурсов возобновляемой энергетики необходимо использование инструментария многокритериального принятия решений [9], [10], применение которого позволяет определить из совокупности доступных видов альтернативных энергетических ресурсов наиболее релевантный для интеграции в исследуемом регионе. В работе рассмотрен метод анализа иерархии (АНР) для оценки 5 энергетических альтернатив возобновляемых источников энергии, доступных на территории республики Адыгея для чего используются шесть основных критериев: природно-климатический, технологический, экономический, социальный, экологический, энергетической безопасности.

II. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Регионы Северного Кавказа являются областями с недостаточной выработкой энергии, нехватку которой они вынуждены ликвидировать за счет ее приобретения из соседних регионов (таблица 1). Одним из решений по обеспечению энергетической самообеспеченности может стать использование возобновляемых источников энергии, обладающих высоким потенциалом в данных географических широтах.

ТАБЛИЦА I. Перечень регионов Северного Кавказа с энергодефицитом по данным 2022 года

Субъект РФ	Производство энергии, за вычетом потребления, млн. кВт*ч	Производство /потребление %
Карачаево-Черкесия	-797.4	44.4
Ингушетия	-878.2	0
Северная Осетия	-1025.6	44.3
Кабардино-Балкария	-1214.9	31.4
Чеченская республика	-1986.9	40.9
Дагестан	-2860.8	62.9
Краснодарский край и Адыгея	-18754.1	37.4

Например, на территории Краснодарского края и республики Адыгея имеются все основные виды возобновляемой энергетики: солнечная, ветровая, геотермальная [11], сырье для биоэнергетики (за счет широкого развития сельскохозяйственной отрасли) и гидроресурсы, доступные за счет наличия большого

количества малых рек и ручьев с быстрой скоростью потока [12].

Для эффективного использования ресурса возобновляемой энергетики необходимо провести не только оценку его потенциала и определить предполагаемые объемы генерации, но и оценить эффективность внедрения подобной системы, для чего использоваться различные метрики, в том числе и критерии эффективности, охватывающие различные аспекты [13]. Рассматриваемые критерии должны удовлетворять основным целям внедрения возобновляемых источников энергии, используемых как средство достижения целей устойчивого развития [14], включающих: сокращение выбросов парниковых газов, обеспечение энергетической безопасности, содействие экономическому росту. В результате, в различных исследованиях выделяют следующие ключевые аспекты, влияющие на эффективное внедрение ВИЭ:

- экологические проблемы [15];
- инвестиционные стратегии [16];
- появление рабочих мест и экономическое развитие при интеграции ВИЭ [17];
- новые разработки в области генерации и накопления [18];
- обеспечение энергонезависимости [19];
- стимулирование использования ВИЭ [20].

На основе этих ключевых аспектов можно систематизировать следующую группу критериев, которую можно применять для выбора наиболее оптимальных энергетических альтернатив в разрезе особенностей исследуемого региона (табл. 2).

ТАБЛИЦА II. КРИТЕРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АЛЬТЕРНАТИВ «ЗЕЛеной ЭНЕРГИИ»

Критерии	Описание	Категории
Экономический (расходы)	Инвестиции, расходы на техническое обслуживание и эксплуатацию, а также другие расходы жизненного цикла	Экономика
Технологический	Установленная мощность, надежность и срок службы	Технологии
Экологический	Загрязнение, выбросы, шум, землепользование и потребительское признание	Среда
Социальный	Возможности трудоустройства, экономическое влияние и региональное развитие	Экономика/общество
Безопасность	Риски, сбои и катастрофы	Технологии/общество
Природно-климатический	Доступность и объемы имеющихся ресурсов возобновляемой энергетики	Среда

Когда определены основные критерии, можно переходить к непосредственной оценке рассматриваемых альтернатив с помощью метода анализа иерархии (АНР). Первый этап метода подразумевает осуществление экспертной оценки и

определение весов каждого из критериев. Выбор АНР обусловлен несколькими факторами, ключевыми из которых являются два: возможность проверки согласованности ответов от нескольких экспертов и хорошая применимость для решения проблем с 5-9 рассматриваемыми факторами [21]. Данный инструментальный многокритериальной оценки основан на

механизме попарного сравнения рассматриваемого множества критериев, для чего процедура опирается на суждения экспертов, способствующие получению шкалы приоритетов. Алгоритм действий для определения итоговых весов критериев и ранжирования исследуемых энергетических альтернатив, представлен на рис. 2 [10].

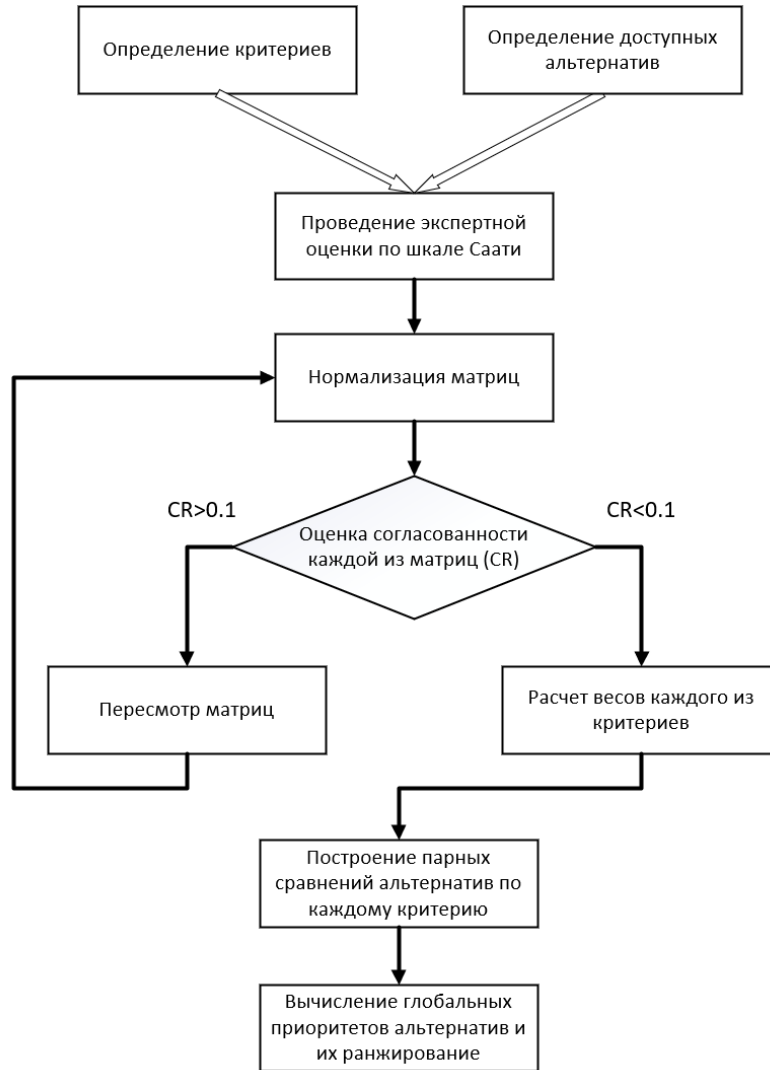


Рис. 2. Алгоритм определения приоритета каждой рассматриваемой альтернативы

Для расчета итоговых весов критериев используется шкала оценки каждого из них от 1 до 9, после чего полученные ответы обрабатываются в автоматизированном режиме средствами языка Python, в результате чего, ответы нескольких экспертов по каждому критерию объединяются для вычисления

среднего геометрического значения, которое затем нормализуется для вычисления веса критерия, после чего рассчитывается согласованность ответов и итоговые веса. Алгоритм работы программного модуля представлен на рис. 3.

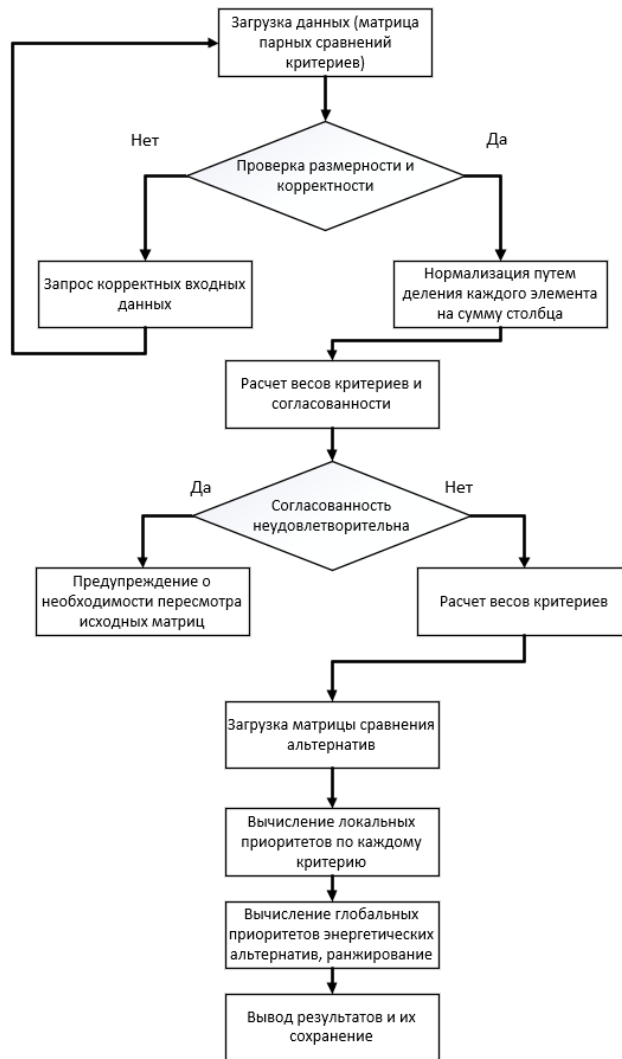


Рис. 3. Алгоритм расчета весов критериев и ранжирования альтернатив

Для расчета итоговых весов критериев и определения приоритетности энергетических альтернатив был разработан программный код, позволяющий в автоматическом режиме определить согласованность матриц и итоговые веса согласно методу анализа

иерархий. Для его работы используются входные данные – экспертные оценки, предоставляемые в виде файла на вход программе.

Пример матрицы парных сравнений критериев представлен в табл. 3.

ТАБЛИЦА III. МАТРИЦА ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ КРИТЕРИЕВ

Критерии	Экономический	Технологический	Экологический	Социальный	Безопасности	Природно-климатический
Экономический	1	2	4	7	6	1/2
Технологический	1/2	1	2	5	3	2
Экологический	1/4	1/2	1	5	2	1/2
Социальный	1/7	1/5	1/5	1	1/2	1/7
Безопасности	1/6	1/3	1/2	2	1	1/2
Природно-климатический	2	1/2	2	7	2	1

В результате индекс согласованности имеет значение менее 0.1 (0.0755), что доказывает согласованность полученной матрицы, на основе которой можно определить значения итоговых весов для каждого из рассматриваемых критериев:

- экономический 0.3134;

- технологический 0.2288;
- экологический 0.1176;
- социальный 0.0337;
- безопасность 0.0695;
- природно-климатический 0.2370.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Далее по аналогии формируются матрицы парных сравнений для оценки каждой альтернативы относительно каждого из рассмотренных критериев, в результате чего формируется 6 новых матриц, позволяющих получить первичные веса для каждой альтернативы, значение которых на следующем этапе корректируется посредством учета значений самих критериев, в результате чего итоговые оценки принимают следующий вид:

- солнечная 0.3428;
- ветровая 0.2858;
- гидроэнергия 0.1922;
- биоэнергетика 0.1064;
- геотермальная 0.0728.

В результате проведенных расчетов становится понятно, что двумя наиболее выгодными для интеграции энергетическими источниками является солнечная и ветровая энергия, которые уже используются в существующей энергетической системе региона [22]. При этом, наибольшее значение показателя имеет солнечная энергия, хотя теоретическая оценка потенциала показывает, что потенциал ветровой энергии на территории республики Адыгея больше теоретического потенциала солнечной энергии, а объемы доступного биоэнергетического ресурса эквивалентны объемам мощности приходящей инсоляции [23], [24].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были определены 7 наиболее значимых критериев для оценки энергетических альтернатив, отвечающих целям устойчивого развития и эффективного использования ресурсов возобновляемой энергетики. Критерии были ранжированы по степени важности при помощи метода анализа иерархии, на основе чего была произведена оценка имеющихся видов возобновляемой энергии на территории республики Адыгея, что позволило выявить наиболее подходящие для использования энергетические ресурсы. Недостатком данного способа многокритериальной оценки является необходимость пересмотра имеющихся оценок для оценки существующих энергетических альтернатив в каждом конкретном регионе, поскольку влияние факторов может быть различным, как и количество доступных видов возобновляемой энергии, однако автоматизация данного процесса упрощает пересчет весов коэффициентов, для чего требуется лишь подать на вход программе новые данные от экспертов.

Полученные результаты являются качественным дополнением к ранее разработанной методике оценки валового и технологического потенциала энергетических ресурсов, которая не позволяла учесть все факторы, что было решено посредством совокупного использования методов оценки потенциала ресурсов и многокритериальной оценки, позволяя определить наиболее релевантные виды энергетических ресурсов, доступных на территории исследуемого региона, позволяя тем самым оптимизировать процесс разработки конфигурации энергетической системы.

- [1] Xi Yuan, Chi-Wei Su, Muhammad Umar, Xuefeng Shao, Oana-Ramona LOBONT. The race to zero emissions: Can renewable energy be the path to carbon neutrality? *Journal of Environmental Management*, Volume 308, 2022, 114648, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114648>.
- [2] IEA (2024), Renewable energy demand growth by sector, main case, 2023-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-energy-demand-growth-by-sector-main-case-2023-2030>, Licence: CC BY 4.0
- [3] Simankov, V.; Buchatskiy, P.; Kazak, A.; Teploukhov, S.; Onishchenko, S.; Kuzmin, K.; Chetyrbok, P. A Solar and Wind Energy Evaluation Methodology Using Artificial Intelligence Technologies. *Energies* 2024, 17, 416. <https://doi.org/10.3390/en17020416>.
- [4] P. Y. Buchatskiy, S. V. Onishchenko, S. V. Teploukhov and K. A. Kuzmin, "Modeling of Wind Generator in the Power Supply System of an Individual Consumer Using SimInTech," 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCT62929.2024.10874937.
- [5] O. Demirtas, "Evaluating the Best Renewable Energy Technology for Sustainable Energy Planning", *IJEET*, vol. 3, no. 4, pp. 23–33, 2013.
- [6] Simankov V. S., Buchatskiy P. Y., Onishchenko S. V., Teploukhov S. V. Review of Models for Estimating and Predicting the Amount of Energy Produced by Solar Energy Systems // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. no. 5. pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.2205/2023ES02SI01>
- [7] V. S. Simankov, P. Y. Buchatskiy, S. V. Teploukhov, A. N. Cherkasov and S. V. Onishchenko, "Designing an Intelligent Information and Analytical System for Evaluating Solutions in Renewable Energy Based on Digital Twins," 2023 Seminar on Information Systems Theory and Practice (ISTP), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 85-88, doi: 10.1109/ISTP60767.2023.10426987.
- [8] Симанков В.С. Автоматизация системных исследований: монография. Техн. ун-т КубГУ. Краснодар, 2002. 376 с.
- [9] San Cristóbal, José Ramón. "Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method." *Renewable energy* 36.2 (2011): 498-502.
- [10] Shatnawi, N., Abu-Qdais, H., & Abu Qdais, F. (2021). Selecting renewable energy options: an application of multi-criteria decision making for Jordan. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 17(1), 209–219. <https://doi.org/10.1080/15487733.2021.1930715>
- [11] P. Y. Buchatskiy, S. V. Onishchenko, S. V. Teploukhov and K. A. Kuzmin, "Modeling of Geothermal Heating System for an Individual Heating Station," 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Astrakhan, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCT58878.2023.10347126.
- [12] S. V. Onishchenko, A. R. Mamiy and K. A. Yurkaev, "Development of Hardware Module for Collecting Parameters of Microhydroelectric Power Plant Operation in Mountainous Conditions," 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 245-249, doi: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553856.
- [13] Xue, X.; Zhang, Q.; Cai, X.; Ponkratov, V.V. Multi-Criteria Decision Analysis for Evaluating the Effectiveness of Alternative Energy Sources in China. *Sustainability* 2023, 15, 8142. <https://doi.org/10.3390/su15108142>
- [14] Wang, G.; Sadiq, M.; Bashir, T.; Jain, V.; Ali, S.A.; Shabbir, M.S. The dynamic association between different strategies of renewable energy sources and sustainable economic growth under SDGs. *Energy Strat. Rev.* 2022, 42, 100886.
- [15] Gayen, D., Chatterjee, R. & Roy, S. A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 21, 5285–5310 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05380-z>
- [16] Zhang, M. M., Peng Zhou, and D. Q. Zhou. "A real options model for renewable energy investment with application to solar photovoltaic power generation in China." *Energy Economics* 59 (2016): 213-226.

- [17] Dirma, V.; Neverauskienė, L.O.; Tvaronavičienė, M.; Danilevičienė, I.; Tamošiūnienė, R. The Impact of Renewable Energy Development on Economic Growth. *Energies* 2024, 17, 6328. <https://doi.org/10.3390/en17246328>
- [18] Jun Wen, Chukwuemeka Valentine Okolo, Ifeanyi Celestine Ugwuoke, Kibir Kolani, Research on influencing factors of renewable energy, energy efficiency, on technological innovation. Does trade, investment and human capital development matter? *Energy Policy*, Volume 160, 2022, 112718, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112718>.
- [19] Khalid Khan, Adnan Khurshid, Javier Cifuentes-Faura, Dai Xianjun, Does renewable energy development enhance energy security? *Utilities Policy*, Volume 87, 2024, 101725, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2024.101725>.
- [20] Liu, S.; Huang, Y.; Wang, Y.; Shao, Q.; Zhou, H.; Wang, J.; Chen, C. Incentive Mechanisms to Integrate More Renewable Energy in Electricity Markets in China. *Energies* 2023, 16, 6573. <https://doi.org/10.3390/en16186573>
- [21] Saaty TL (1990) Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. RWS Publications
- [22] П. Ю. Бучацкий, С. В. Онищенко, С. В. Теплоухов, К. А. Кузьмин Использование «зеленой» энергии в энергосистеме региона // ESG-факторы и технологии роста: Сб. докладов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–24 июня 2023 года. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2023. С. 13-17.
- [23] П. Ю. Бучацкий, С. В. Онищенко, С. В. Теплоухов, Т. Ю. Бычков. Реализация программного модуля оценки потенциала биоэнергетических ресурсов // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2024. № 3(346). С. 34-42. DOI 10.53598/2410-3225-2024-3-346-34-42. EDN IQYFQH.
- [24] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686608 Российская Федерация. Программный модуль оценки энергетического потенциала биоресурса в регионе «ВЮЕн»: № 2024685407: заявл. 28.10.2024 : опубл. 11.11.2024 / С. В. Теплоухов, С. В. Онищенко, П. Ю. Бучацкий [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Адыгейский государственный университет». EDN GUHSDI.