

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ



В.А. Грачев

МГУ им. М.В. Ломоносова

Рассмотрено влияние различных энергетических технологий, получивших практическое распространение, на показатели устойчивого развития. Приведены результаты системного анализа экологических, экономических и социальных аспектов устойчивого развития при применении энергетических технологий, использующих в качестве первичного источника энергии уголь, газ, гидро-, солнце-, ветро- и атомную энергию. Сравнительный системный анализ энергетических технологий показал, что наилучшими энергетическими технологиями для устойчивого развития являются природный газ и атомная энергия.

Ключевые слова: энергетика, устойчивое развитие, экологические, экономические и социальные показатели угольной, газовой, гидро-, ветро-, солнечной и атомной энергетики

Energy Technologies and Sustainable Development

V.A. Grachev

Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia

The authors have considered the influence of practically applied energy technologies on the indicators of sustainable development. The article presents the results of a systematic analysis of the sustainable development's environmental, economic and social aspects regarding the energy technologies that use coal, gas, hydro, solar, wind and nuclear energy as their primary energy source. According to the comparative systematic analysis performed by the authors, the energy technologies that use natural gas and nuclear energy are the best for sustainable development.

Key words: power engineering, sustainable development, ecological, economic and social indicators of coal, gas, hydro, wind, solar and nuclear energy

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-61-65

Экологическая, экономическая и социальная эффективность энергетических технологий зависит от того, какой вид исходной энергии используется, и определяется влиянием данной технологии на окружающую среду и экологическую безопасность для персонала и населения, экономические и социальные показатели устойчивого развития.

Изъятие энергии для нужд человека всегда связано с теми или иными экологическими проблемами: изменением климата, загрязнением окружающей среды, экологической безопасностью.

Совершенно очевидно, что некоторые энергетические технологии не сопровождаются вы-

делением парниковых газов и поэтому не влияют на глобальное изменение климата. Однако, чтобы создать устройства для преобразования энергии солнца или ветра, или построить атомную электростанцию, необходимо получить конструкционные материалы, изготовить оборудование, выполнить строительные работы, использовать материалы и транспортные средства для их эксплуатации и т.д., что, в свою очередь, связано с выделением парниковых газов и, следовательно, с глобальным изменением климата.

Обобщенным показателем такого влияния стал углеродный след. И это не единственный показатель. Существенные экологические показатели — это мас-

са, изымаемая из природы, на единицу энергии, выделение вредных газов, пыли, сброс вредных веществ в водные источники, образование отходов, отчуждение земельных ресурсов, выделение радиоактивных веществ и риск для персонала и населения.

Международное энергетическое агентство (МЭА; International Energy Agency, IEA) представило отчет по итогам энергетической отрасли за 2017 г. (Global energy and CO₂ status report — 2017) [1, 2].

Глобальное потребление энергии в 2017 г. выросло на 2,1 % (годом ранее показатель роста составил 0,9 %) и достигло 14 млрд 50 млн т нефтяного эквивалента (в 2000 г. уровень потребления был равен 10 млрд 35 млн т). Более

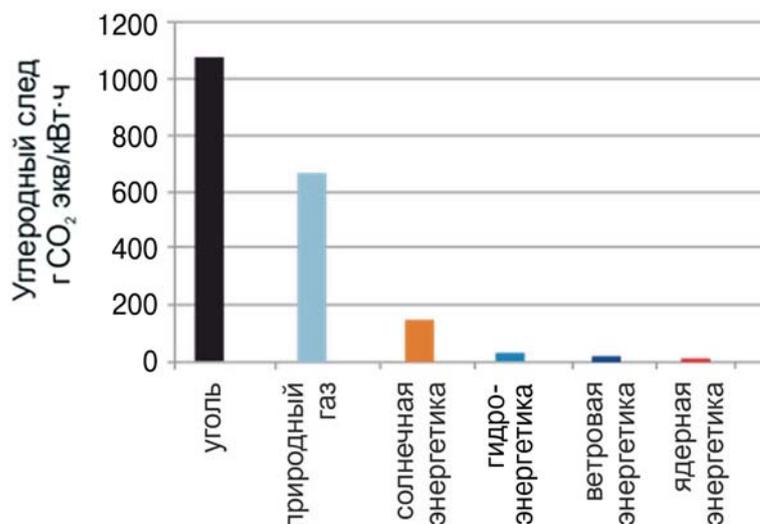


Рис. 1. Углеродный след по глобальной оценке POST (данные по всему миру) [16]

Fig. 1. Global carbon footprint estimated by POST (worldwide data) [16]

40 % увеличения обеспечили Китай и Индия, а 20 % — страны с развитой экономикой. Около 72 % прироста пришлось на ископаемое топливо, четверть — на возобновляемые источники энергии, а остальное — на атомные электростанции. Потребление нефти увеличилось на 1,5 % (эквивалентно 1,5 млн баррелей в день).

Потребление электроэнергии возросло на 3,1 %, 70 % данного прироста приходится на Китай и Индию. Заметный рост выработки атомных электростанций произошел благодаря нескольким АЭС, для которых 2017 г. стал первым полным годом работы.

Влияние энергетических технологий на устойчивое развитие изучается во всех трех аспектах с точки зрения влияния на глобальные экологические проблемы [3]: экологическом, экономическом и социальном. И в последнее время анализируется также с точки зрения достижения целей устойчивого развития (ЦУР) [4].

Изучение экологической эффективности энергетических технологий [5, 6] в последнее время получило новые дополнительные возможности, благодаря расширению круга показателей [7] и изучению углеродного следа [8–10].

Экологическим аспектам различных видов генерации посвящено много научных работ [11–15].

Устойчивое развитие признано всем мировым сообществом, и его экономические, экологические и социальные показатели важны для всех отраслей мирового хозяйства и в первую очередь для энергетики.

Чтобы дать объективный, научно-обоснованный анализ всех имеющихся данных об экологических, экономических и социальных показателях энергетических технологий, необходимо предложить методике их оценки и провести сравнение различных энергетических технологий по выбранным показателям, связав их с реализацией ЦУР.

Для сравнения выбраны угольная, газовая, гидравлическая, солнечная, ветряная, ядерная энергетические технологии.

Для системного анализа использовались данные общепризнанных источников: МЭА, Парламентского управления по науке и технологии (POST) и др.

Показателями экологической эффективности выбраны:

- удельное выделение энергии из единицы массы (показатель Э1);
- количество выделяющихся парниковых газов (Э2);
- выброс вредных веществ в атмосферу (Э3);
- сброс вредных веществ в водные источники (Э4);
- образование отходов (Э5);
- отчуждение земель (Э6);

- выделение радиоактивных веществ (Э7);
- риск для людей и ущерб здоровью населения (Э8);
- углеродный след (Э9);
- абиотическое истощение неископаемых ресурсов (Э10);
- абиотическое истощение ископаемого топлива (Э11);
- потенциал подкисления (Э12);
- потенциал эвтрофикации, т.е. заболачивания (Э13);
- потенциал пресноводной экотоксичности (Э14);
- потенциал глобального потепления (Э15);
- потенциал токсичности для человека (Э16);
- потенциал токсичности для морской воды (Э17);
- потенциал истощения озона (Э18);
- потенциал образования фотохимического озона (Э19);
- потенциал наземной экотоксичности (Э20).

Показатели Э1–Э9 широко распространены и уже применялись при анализе экологической эффективности [3]. Показатели Э10–Э20 введены в связи с тем, что их также начали применять [7] для анализа различных источников энергии.

Показателями экономической эффективности выбраны:

- полная приведенная стоимость — условный показатель кВт·ч (Ц1);
 - капитальные затраты на 1 кВт·ч установленной мощности (Ц2);
 - затраты на топливо на 1 кВт·ч полученной энергии (Ц3).
- Показателями социальной эффективности приняты:
- полная занятость (С1);
 - травматизм работающих (С2);
 - индекс общественной поддержки (С3);
 - диверсификация поставок топлива (С4).

Социальные показатели эффективности характеризуют:

- ✓ С1 — число занятых в выработке электроэнергии персон на 1 кВт·ч;
- ✓ С2 — число травм в единицах на 1 ТВт·ч энергии;
- ✓ С3 — общественную поддержку и экспертную оценку в процентах;

✓ С4 — замещаемость источника (например, солнечной энергии ночью).

Результаты наших исследований по показателям Э1–Э8 приведены в работе [3]. Показано, что топливная энергетика наименее эффективна, хотя преимущество углеводородов очевидно. Гидро, солнце и ветер — это вторичные источники от термоядерного реактора — Солнца. Они не требуют затрат вещества, как топливо. И самым эффективным является превращение самого вещества в энергию в соответствии с законом $E = mc^2$.

В работе Парламентского управления по науке и технологиям Великобритании [16] подробно изучен углеродный след атомной энергетики. Показано, что по европейским данным 2004–2006 г. углеродный след для угля составлял 1075 гСО₂экв/кВт·ч, а для ядерной энергетики — 3,5–5 гСО₂экв/кВт·ч (рис. 1).

Показатель "углеродный след" для людей то же, что ВВП, т.е. практически "ни о чём". Им важно как влияют энергетические технологии на жизнь и их здоровье.

По данным Европейского сообщества и Министерства энергетики США, ущерб здоровью населения наименьший при ветровой и ядерной энергетиках (рис. 2).

В отчетах Комиссии европейских сообществ (при сотрудничестве с Министерством энергетики США) по оценке и сравнительному анализу "внешней цены" разных видов производства электроэнергии приведено сравнение ущерба здоровью всего населения Европы (480 млн чел.) при производстве электроэнергии на основе разных энергоносителей. Ущерб здоровью населения выражен в натуральных показателях — потерянные годы жизни на кВт·ч выработанной электроэнергии — и представлен в усредненном виде. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о безусловных преимуществах ядерного топливного цикла (ЯТЦ) перед энергетикой на углеводородном топливе.

Сравнение по показателям Э10–Э20 дано в работе J. Соорег [7]. Особое внимание в ней уделено сланцевому газу. Его пока-

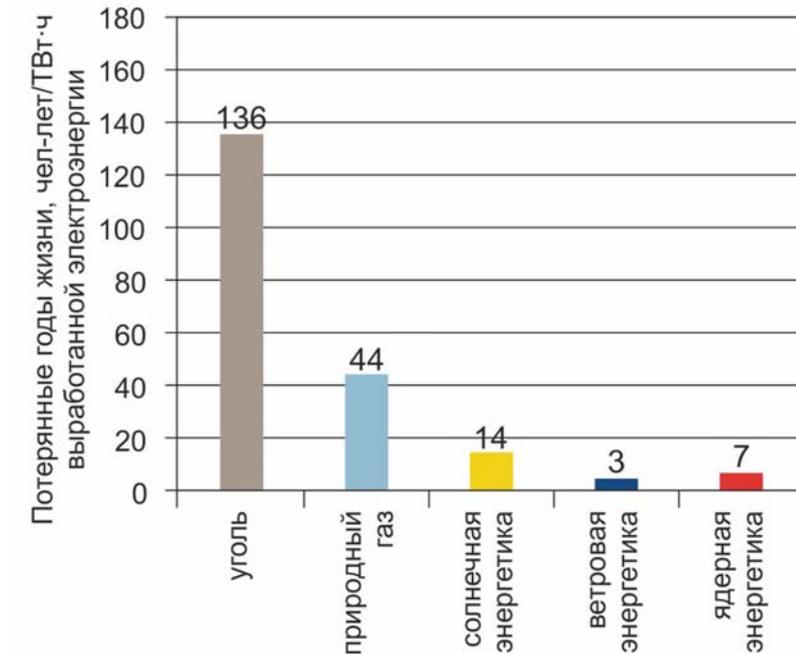


Рис. 2. Ущерб здоровью населения Европы при производстве электроэнергии на различных видах топлива, потерянные годы жизни [18]
Fig. 2. Damage to the population health in Europe caused by the electricity generation from various fuel types, lost years of life [18]

затели близки к природному газу за исключением тех, что связаны с гидроразрывом пласта и вредным экологическим влиянием, которое хорошо известно. В работе [7] даны также конкретные данные по показателям Э10–Э20 и для тех энергоисточников, что мы рассматриваем в данной работе (уголь, газ, гидро, солнце, ветер и атом).

Сравнение всех экологических показателей в относительных единицах, т.е. в % от наилучших, приведено на рис. 3 (чем выше значение, тем лучше).

Из анализа всех данных Э1–Э20, Ц1–Ц3 и С1–С4 становится очевидным, что ядерная энергетика является лидирующей. Но главное — как это влияет на жизнь людей. Кстати,

Таблица 1. Показатели устойчивости и их оценочные значения для различных вариантов электроснабжения [7]

Table 1. Stability indicators and their estimated values for various power supply options [7]

Факторы устойчивого развития	Показатели	Уголь	Природный газ	Энергия			
				гидро	солнечная	ветра	ядерная
Экологические	Э10	0,04	0,24	0,01	10,91	0,22	0,07
	Э11	11,70	6,33	0,04	1,05	0,15	0,09
	Э12	5,13	1,71	0,06	0,43	0,06	0,06
	Э13	1,86	0,06	0,01	0,29	0,03	0,02
	Э14	287,9	2,47	1,65	63,90	14,70	21,20
	Э15	1078,84	420,00	3,70	88,91	12,35	7,79
	Э16	294,86	38,00	6,15	205,47	61,81	111,43
	Э17	1577,32	0,50	2,70	205,69	23,08	43,66
	Э18	5,59	18,90	0,23	17,40	0,74	19,00
	Э19	285	34,40	2,04	67,00	6,97	5,55
Экономические	Э20	1,75	0,15	0,19	1,12	1,81	0,74
	Ц1	13,85	8,00	14,60	6,70	9,73	7,70
	Ц2	4,60	0,90	11,29	5,70	7,70	7,00
Социальные	Ц3	3,60	4,90	0,00	0,00	0,00	0,50
	С1	191,0	62,00	782,35	635,00	368,00	87,00
	С2	4,50	0,54	14,59	4,84	2,30	0,59
	С3	-7,00	34,00	72,00	75,00	59,00	9,00

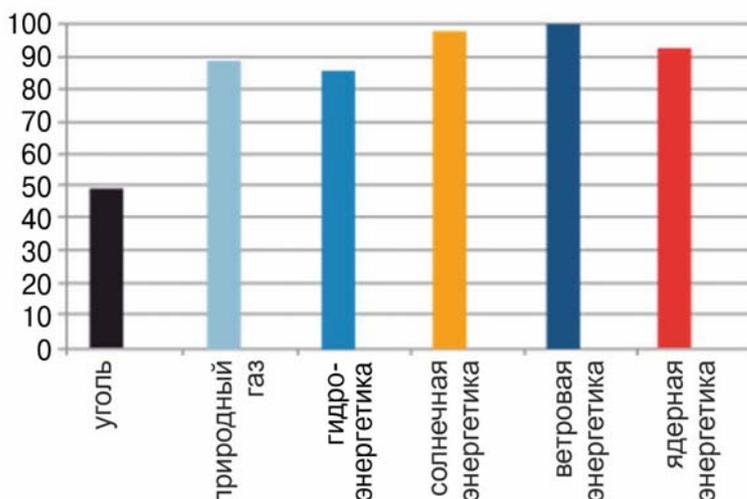


Рис. 3. Сравнительные показатели устойчивости источников генерации по сумме трех аспектов оценки (экологический, экономический и социальный) [7]

Fig. 3. Comparative indicators of the generation sources' sustainability by the sum of three aspects of the assessment (environmental, economic and social) [7]

Таблица 2. Данные опроса по экологическим показателям*
Table 2. Survey data on environmental indicators*

Показатель	Источники					
	Уголь	Газ	Гидро	Солнце	Ветер	Атом
Изменение рельефа и ландшафта	10**	1	10	8	5	1
Зола, унос PM 2,5***	10	0	0	0	0	0
Гибель людей	10	1	5	0	0	1
Общее влияние на климат	10	4	4	2	5	1
Отчуждение земель	3	1	10	10	10	1
Воздействие на фауну	1	1	10	5	10	1
Видеоэкология	1	1	5	5	10	1
Проблема отходов	5	1	1	10	3	4
Суммарный показатель	50	10	45	40	43	10

*Собственные данные.
 **10 – наиболее отрицательный показатель, 0 – влияние отсутствует.
 ***Частицы размером менее 2,5 мкм (очень опасны).

это касается, как указано выше, и такого показателя, как ВВП. Сам по себе он не интересует людей, им важно, счастливы ли они, считают ли свою жизнь хорошей или достойной. ВВП тем выше, чем ниже экологические и социальные показатели. Разлив нефти увеличивает ВВП, а экологическое состояние окружающей среды при этом ухудшается. Поэтому очень важно проанализировать, как влияют источники энергии на достижения ЦУР, а также на людей.

Кроме показателей Э1–Э20 воздействие на окружающую среду может быть оценено экспертами по некоторым вербальным, т.е. "воспринимаемым со слов" показателям. Мы опросили 49 экспертов по аналогии с проектом ExternE [17] и выяснили,

что люди довольны не показателями ВВП, а отсутствием у них во дворе мусоросжигательного завода или угольной ТЭЦ на соседней улице. Данные опроса представлены в табл. 2.

Отчуждение земель, материалоёмкость и все другие показатели в итоге приводят к тому, что только газ и атом в 4 раза привлекательнее, чем все остальные виды генерации.

Данные показатели (см. табл. 2) люди считают более важными для себя, чем многие другие.

Генеральная Ассамблея ООН в 2015 г. приняла резолюцию "Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года".

Глобальная политика в области климата и планы ЦУР тесно

взаимосвязаны: то, как проблема климата решается, сильно влияет на перспективы обращения с многочисленными другими ЦУР и наоборот.

Обобщая, можно сформулировать ЦУР следующим образом: искоренить нищету, обеспечить доступ к пище, чистой воде, энергии, здравоохранению и образованию по всему миру, достичь гендерного равенства, гарантировать достойную работу для всех, построить стойкую инфраструктуру, сократить неравенство доходов, содействовать развитию городов, рациональному потреблению и производству, найти решение проблемы изменения климата, сохранить океаны, предотвратить обезлесение, а также сформировать структуры, необходимые для достижения этих целей, включая глобальное партнерство, содействующее устойчивому развитию.

ЦУР представляют собой политический консенсус, по которому все участвующие государства-члены могли бы прийти к согласию.

Природный газ, получивший развитие как источник энергии во второй половине XX в. и в XXI в. вошедший в лидеры источников энергии, — всемирно признанное средство реализации ЦУР. Природный газ уже во многих регионах мира обгоняет уголь по объемам потребления. Вместе с тем, газ иногда становится объектом неоправданной критики, и некоторыми экспертами предпринимаются попытки объявить "начало конца" эры углеводородов. Однако методы системного анализа убедительно доказывают всю очевидность абсурдности утверждений о "начале конца".

Научное обоснование использования природного газа в реализации ЦУР основано на его полезности для каждой из 17 Целей устойчивого развития.

Таким образом, анализ влияния энергетических технологий показал, что наилучшими экологическими, экономическими и социальными показателями обладают природный газ и атомная энергия, которые наиболее эффективны для достижения целей устойчивого развития.

Литература

1. **Global energy and CO₂ status report**, 2017. P. 15. URL: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf>
2. **Могиленко А.** Энергетические итоги 2017 года: по следам отчета МЭА. Энергетика и промышленность России. 2018. № 9 (341). URL: <https://www.eprussia.ru/ep/341/6357077.htm>
3. **Грачев В.А., Плямина О.В.** Экологическая эффективность решения глобальных проблем при использовании различных способов генерации энергии. Экология и промышленность России. 2016 (6). Т. 20. № 9. С. 34–39.
4. **Аксютин О.Е., Ишков А.Г., Романов К.В., Грачев В.А.** Роль природного газа в реализации ЦУР. Газовая промышленность. 2018. № 7 (771). С. 20–32.
5. **Grachev V.A.** Global Environmental Problems, Environmental Safety and Environmental Efficiency of the Power Industry. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences (ISSN09758585). 11-12/2016. 7(6). С. 329–339.
6. **Грачев В.А., Плямина О.В.** Экологические характеристики различных способов генерации электроэнергии. Атомная энергия. 2017. Т. 123. № 3. С. 160–164.
7. **Jasmin Cooper.** Life Cycle Sustainability Assessment of Shale Gas in the UK. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Science and Engineering. The University of Manchester. 2017. URL: https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/61847529/FULL_TEXT.PDF.
8. **Environmental** impact of the energy industry. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_the_energy_industry, 2017 (дата обращения 26.05.2019).
9. **Energy Associates.** The carbon footprint of indoor Cannabis production. Energy Policy. 2012. Vol. 46. P. 58–67.
10. **Defendorfer J.E., and R.W. Compton.** Land cover and topography affect the land transformation caused by wind facilities. PLOS ONE. 2014. Vol. 9. Is. 2. e88914. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088914>
11. **Universität Stuttgart** 2013. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.uni-stuttgart.de/index.html> (дата обращения 18.08.2017).
12. **Блис Т.** Лекарство для планеты. Безболезненное средство от энергетической и экологической катастрофы. М., Изд-во Общественный совет ГК "Росатом", 2009. 512 с.
13. **Прогноз** возможных экологических последствий добычи сланцевого газа в Европе. Под ред. В.А. Грачева. М., НИИПЭ, Неправительственный экологический фонд имени В.И. Вернадского, 2014. 200 с.
14. **Linh Pham.** Nuclear Energy – Reaching the sustainable development goals. [Электронный ресурс]. URL: <http://globetamk.weebly.com/blog/nuclear-energy-reaching-the-sustainable-development-goals> (дата обращения 27.05.2018).
15. **David L. McCollum, Luis Gomez Echeverri, Sebastian Busch, Shonali Pachauri, Simon Parkinson, Joeri Rogelj, Volker Krey, Jan C. Minx, Mans Nilsson, Anne-Sophie Stevance and Keywan Riahi.** Connecting the sustainable development goals by their energy interlinkages. [Электронный ресурс]. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaafe3/pdf> (дата обращения 27.05.2018).
16. **Parliamentary Office of Science and Technology.** Carbon footprint of electricity generation. Posnote, 2006. No. 268. P. 1–4. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.parliament.uk/documents/post/postpn268.pdf> (дата обращения 27.05.2018).
17. **ExternE** (Проект по оценке влияния изобретений в энергетике) за 1995–2005 гг. [Электронный ресурс]. URL: http://www.externe.info/externe_2006/publications.html (дата обращения 26.07.2017).
18. **Grachev V.A.** Environmental effectiveness of energy technologies. International Journal of GEOMATE. 2019. Vol. 16. Iss. 55. P. 228–237. URL: <https://doi.org/10.21660/2019.55.271117>.

References

1. **Global energy and CO₂ status report**, 2017. P. 15. URL: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf>
2. **Mogilenko A.** Energeticheskie itogi 2017 goda: po sledam otcheta MEA. Energetika i promyshlennost' Rossii. 2018. № 9 (341). URL: <https://www.eprussia.ru/ep/341/6357077.htm>
3. **Grachev V.A., Plyamina O.V.** Ekologicheskaya effektivnost' resheniya global'nykh problem pri ispol'zovanii razlichnykh sposobov generatsii energii. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2016 (6). Т. 20. № 9. С. 34–39.
4. **Aksyutin O.E., Ishkov A.G., Romanov K.V., Grachev V.A.** Rol' prirodnogo gaza v realizatsii TsUR. Gazovaya promyshlennost'. 2018. № 7 (771). С. 20–32.
5. **Grachev V.A.** Global Environmental Problems, Environmental Safety and Environmental Efficiency of the Power Industry. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences (ISSN09758585). 11-12/2016. 7(6). С. 329–339.
6. **Grachev V.A., Plyamina O.V.** Ekologicheskie kharakteristiki razlichnykh sposobov generatsii elektroenergii. Atomnaya energiya. 2017. Т. 123. № 3. С. 160–164.
7. **Jasmin Cooper.** Life Cycle Sustainability Assessment of Shale Gas in the UK. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Science and Engineering. The University of Manchester. 2017. URL: https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/61847529/FULL_TEXT.PDF.
8. **Environmental** impact of the energy industry. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_the_energy_industry, 2017 (дата обращения 26.05.2019).
9. **Energy Associates.** The carbon footprint of indoor Cannabis production. Energy Policy. 2012. Vol. 46. P. 58–67.
10. **Defendorfer J.E., and R.W. Compton.** Land cover and topography affect the land transformation caused by wind facilities. PLOS ONE. 2014. Vol. 9. Is. 2. e88914. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088914>
11. **Universität Stuttgart** 2013. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.uni-stuttgart.de/index.html> (дата обращения 18.08.2017).
12. **Blis T.** Lekarstvo dlya planety. Bezboleznennoe sredstvo ot energeticheskoi i ekologicheskoi katastrofy. М., Izd-vo Obshchestvennyi sovet GK "Rosatom", 2009. 512 s.
13. **Prognoz** vozmozhnykh ekologicheskikh posledstviy dobychi slantsevoogo gaza v Evrope. Pod red. V.A. Gracheva. М., NIPE, Nepravitel'stvennyi ekologicheskii fond imeni V.I. Vernadskogo, 2014. 200 s.
14. **Linh Pham.** Nuclear Energy – Reaching the sustainable development goals. [Электронный ресурс]. URL: <http://globetamk.weebly.com/blog/nuclear-energy-reaching-the-sustainable-development-goals> (дата обращения 27.05.2018).
15. **David L. McCollum, Luis Gomez Echeverri, Sebastian Busch, Shonali Pachauri, Simon Parkinson, Joeri Rogelj, Volker Krey, Jan C. Minx, Mans Nilsson, Anne-Sophie Stevance and Keywan Riahi.** Connecting the sustainable development goals by their energy interlinkages. [Электронный ресурс]. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaafe3/pdf> (дата обращения 27.05.2018).
16. **Parliamentary Office of Science and Technology.** Carbon footprint of electricity generation. Posnote, 2006. No. 268. P. 1–4. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.parliament.uk/documents/post/postpn268.pdf> (дата обращения 27.05.2018).
17. **ExternE** (Проект по оценке влияния изобретений в энергетике) за 1995–2005 гг. [Электронный ресурс]. URL: http://www.externe.info/externe_2006/publications.html (дата обращения 26.07.2017).
18. **Grachev V.A.** Environmental effectiveness of energy technologies. International Journal of GEOMATE. 2019. Vol. 16. Iss. 55. P. 228–237. URL: <https://doi.org/10.21660/2019.55.271117>.

В.А. Грачев – д-р техн. наук, член-корр. РАН, профессор, руководитель Центра глобальной экологии факультета глобальных процессов МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы 1, стр. 13А

V.A. Grachev – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Professor, Head of the Center for Global Ecology, Faculty of Global Processes, Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia, Leninsky gory 1, bld. 13A