

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УЧАСТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА***Екатерина Дмитриевна ИВАНЦОВА^а, Юлия Сергеевна ЦЫРО^б, Антон Игоревич ПЫЖЕВ^с**

^а студентка магистратуры кафедры социально-экономического планирования Института экономики, управления и природопользования, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация
e.d.iv@ya.ru

ORCID: отсутствует

SPIN-код: отсутствует

^б студентка магистратуры кафедры социально-экономического планирования Института экономики, управления и природопользования, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация
juliatsyro@mail.ru

ORCID: отсутствует

SPIN-код: отсутствует

^с кандидат экономических наук, заведующий научно-учебной лабораторией экономики природных ресурсов и окружающей среды Института экономики, управления и природопользования, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация
ruanist@ya.ru

ORCID: отсутствует

SPIN-код: 3984-2277

* Ответственный автор

История статьи:

Получена 24.05.2018

Получена в доработанном виде 12.06.2018

Одобрена 03.07.2018

Доступна онлайн 14.09.2018

УДК 621.039.003

JEL: Q48, Q53, Q54

Ключевые слова:

атомная энергетика, глобальное изменение климата, экологическая эффективность, низкоуглеродная экономика, природно-техногенные риски

Аннотация

Предмет. Возможность решения и смягчения последствий данной проблемы путем развития атомной энергетики как альтернативного источника генерации электроэнергии, отличающегося высокой экологической эффективностью.

Цели. Комплексное исследование возможности участия атомной энергетики в решении проблемы глобального изменения климата. Оценка рисков использования атомной энергии на основе ретроспективного анализа развития отрасли.

Методология. В работе использовались методы логического и сравнительного анализа, комплексного обзора академической и отраслевой литературы, статистической информации.

Результаты. Главной причиной глобальной тенденции к изменению климата является изменение концентрации в атмосфере парниковых газов. Сокращение антропогенных выбросов в атмосферу является важной задачей для мирового сообщества на пути к решению проблемы изменения климата. Одним из инструментов снижения уровня выбросов парниковых газов является развитие атомной энергетики, отличающейся высокой степенью экологической эффективности и отсутствием существенного влияния на углеродный баланс, что подтверждается результатами сравнительного анализа характеристик различных видов генерации электроэнергии. Установлено, что с развитием атомной энергетики конструкции электростанций были модернизированы для устранения выявленных технологических недостатков. Это позволяет утверждать, что риски использования атомной энергии искусственно завышены.

Выводы. При тщательном проектировании и выверенной эксплуатации высококвалифицированными специалистами атомные электростанции являются безопасным источником энергии, который в состоянии обеспечить большие электрические мощности для потребления и значительно снизить экологическую нагрузку. За счет практически нулевого уровня выбросов парниковых газов в атмосферу атомные электростанции в состоянии существенно повлиять на экологическую картину мира, что является крайне важной задачей в контексте решения проблемы глобального изменения климата.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2018

Для цитирования: Иванцова Е.Д., Цыро Ю.С., Пыжев А.И. Экономические аспекты участия атомной энергетики в решении проблемы глобального изменения климата // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. – 2018. – Т. 14, № 9. – С. 1632 – 1648.
<https://doi.org/10.24891/ni.14.9.1632>

Введение

Проблема глобального изменения мирового климата вызывает живой научный и общественный интерес. Увеличение среднегодовой температуры атмосферы, вызывающее таяние ледников, повышение уровня Мирового океана, разбалансировка всех природных систем, которая приводит к изменению режима выпадения осадков, температурным аномалиям и увеличению частоты экстремальных явлений, таких как ураганы, наводнения и засухи, – все это не может больше оставаться вне мировой общественной повестки дня. Результаты многочисленных исследований показывают, что именно антропогенная деятельность, в том числе сжигание нефти, газа и угля, является основным фактором образования парникового эффекта, который и вызывает повышение средней температуры. Эксперты отмечают, что в период между 2000 и 2010 гг. наблюдался самый мощный рост выбросов парниковых газов за последние 30 лет¹. На фоне серьезных климатических изменений встает вопрос о возможных путях решения проблемы и смягчения ее последствий, одним из которых является переход к «зеленым» видам генерации электроэнергии, не осуществляющим эмиссию парниковых газов в атмосферу.

Данное исследование посвящено анализу развития атомной энергетики в контексте решения проблемы глобального изменения климата. Целью исследования является оценка целесообразности перехода на атомные

^{*} Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-55-76012, гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-3482.2018.6 и проекта «Зеленый квадрат» Общественного совета ГК «Росатом».

¹ IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Core Writing Team: R.K. Pachauri and L.A. Meyer. – IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
 URL: http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

источники генерации электроэнергии с точки зрения их экологичности и безопасности.

Глобальное изменение климата

Проблема изменения климата на глобальном уровне с каждым годом становится все более актуальной, чем обусловлено возрастание интереса к использованию более экологичных видов генерации энергии.

В течение XX в. средняя температура воздуха на поверхности Земли возросла на 0,74 °С, а средний уровень моря поднялся на 0,19 м. Кроме того, глобальное потепление провоцирует таяние арктических льдов, изменение кислотности океанических вод, рост средней температуры поверхности Земли и изменение снежного покрова.

Сильнее всего на климат влияет изменение концентрации парниковых газов (в основном углекислого газа). Оно может быть вызвано как естественными процессами, протекающими в природе в соответствии с ее внутренними законами, так и быть спровоцировано хозяйственной деятельностью человека. Большинство природных факторов изменения климата являются очень медленными, и их существенное влияние на состояние атмосферы может проявиться через сотни лет. Это утверждение не относится к вулканической активности. Существуют оценки, основанные на глобальных климатических моделях, которые показывают, что средне- и крупномасштабные извержения вулканов могут приводить к долгосрочным колебаниям температурного равновесия больших территорий в пределах 0,5–1,5 °С на горизонте долгосрочных наблюдений [1].

Количество антропогенных выбросов парниковых газов значительно выросло за последнее столетие на фоне экономического роста и роста численности населения, и сейчас их уровень выше, чем когда-либо. Это привело к повышению концентрации в атмосфере углекислого газа, метана и оксидов

азота, что, вероятно, является главной причиной глобального изменения климата.

Дальнейший рост уровня выбросов парниковых газов приведет к сохранению тенденции к потеплению и долгосрочным изменениям во всех компонентах климатической системы, увеличивая вероятность наступления серьезных и необратимых последствий для населения и всех экосистем нашей планеты [2]. Лишь сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу может снизить риски, связанные с изменением климата, и способствовать устойчивости развития экосистем.

В связи с этим, чтобы взять под контроль выбросы парниковых газов и снизить влияние человечества на глобальное изменение климата, в конце 2015 г. были приняты так называемые Парижские соглашения², целью которых являются:

- удержание прироста глобальной средней температуры намного ниже 2 °С сверх доиндустриальных уровней и приложение усилий в целях ограничения роста температуры до 1,5 °С (признавая при этом, что это значительно сократит риски и воздействия изменения климата);
- повышение способности к адаптации к неблагоприятным воздействиям изменения климата и содействие сопротивляемости к изменению климата и развитию при низком уровне выбросов парниковых газов таким образом, который не ставит под угрозу производство продовольствия;
- приведение финансовых потоков в соответствие с траекторией направления развития, характеризующегося низким уровнем выбросов и сопротивляемостью к изменению климата.

В преамбуле к Парижскому соглашению отмечается, что в настоящее время усилия мирового сообщества по сокращению парниковых газов не отвечают указанной цели

– сдерживанию глобального потепления. В связи с этим странам – участницам Парижского соглашения необходимо предпринять более интенсивные меры по сокращению выбросов с использованием любых доступных механизмов. Основным таким механизмом является планомерное сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу за счет перехода на новые технологии и переноса производств [3, 4].

Каждая страна вправе разрабатывать механизмы снижения уровня выбросов парниковых газов и углерода, и атомная энергетика также могла бы быть указана в качестве одного из механизмов [5]. По данному пути пошли 9 стран из тех, что ратифицировали Парижское соглашение: Аргентина, Белоруссия, Индия, Иордания, Китай, Нигер, Объединенные Арабские Эмираты (ОАЭ) и Япония. Среди еще не ратифицировавших Парижское соглашение стран упоминание о роли атомной энергетики содержится в решении национальных задач по снижению выбросов парниковых газов у Турции и Ирана.

Таким образом, атомная энергетика является признанным рядом стран инструментом достижения целей Парижского соглашения. Роль данного механизма снижения выбросов парниковых газов и поддержания углеродного баланса наиболее весома в Китае и Индии³. При этом простое упоминание атомной энергетики в решении национальных задач по снижению выбросов парниковых газов некоторых стран не превращает развитие атомной энергетики в предпочтительную стратегию снижения углеродоемкости национальных экономик [6].

Атомную энергетику нельзя назвать ключевым механизмом снижения экологической нагрузки и поддержания углеродного баланса, однако АЭС являются неотъемлемой частью экологических планов в ряде стран, поэтому будущее атомных станций и перспективы развития отрасли в целом не могут не

² Парижское соглашение: материалы XXI конференции Рамочной конвенции об изменении климата. 2015. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf

³ Кувалдин С. Атомная энергетика и противодействие изменению климата в контексте Парижского климатического соглашения // Индекс безопасности. 2016. Т. 22. № 3-4. С. 43–54.

вызывать интереса как в академическом сообществе, так и на уровне общественного обсуждения.

Электрические генерации и глобальное изменение климата

Задача сокращения выбросов парниковых газов была сформулирована как на глобальном уровне (например, уже ранее упомянутое Парижское соглашение 2015 г.), так и на уровне национального правового регулирования. Например, в Великобритании в 2008 г. был принят Акт об изменении климата (*Climate Change Act*), результаты применения которого обсуждаются британскими исследователями [7]. В качестве одного из способов сократить эмиссию парниковых газов называют переход к альтернативным низкоуглеродистым видам генерации энергии, например к атомной энергетике. Атомные электростанции безопасны, надежны и не осуществляют выбросов парниковых газов, в связи с чем стоит рассматривать атомную энергетiku как наиболее привлекательную для инвестиций отрасль. С другой стороны, нельзя не отметить вопросы объемов, стоимости утилизации и безопасности производимых радиоактивных отходов, которые требуют отдельного исследования. Кроме того, в статье [7] обсуждаются риски техногенных катастроф на примере событий на АЭС Три-Майл-Айленд (1979 г.), Чернобыльской АЭС (1986 г.), Фукусима-1 (2011 г.). Среди причин аварий прежде всего выделяют ошибки и недочеты в проектировании станций и человеческий фактор. Тем не менее отмечается, что после упомянутых происшествий конструкции атомных электростанций были пересмотрены таким образом, чтобы обеспечить существенный рост безопасности их функционирования.

Риски происшествия аварий на атомных электростанциях являются отдельным объектом исследования [8], в котором рассматриваются технологические риски в тех областях, где безопасность является критически важным фактором – строительстве летательных аппаратов и сооружении атомных

реакторов. Отмечается, что технологический риск стал важным объектом современного управления, причем основными агентами в данном контексте являются государственные регуляторы, а главной мерой – оценка надежности. Существует множество сомнений насчет доверия оценкам надежности, поскольку проведение предсказательных вычислений с необходимой для таких систем степенью надежности представляет собой серьезную эпистемологическую проблему. Тем не менее данные, получаемые с помощью прогнозных расчетов для сферы авиации, считаются достаточно точными; признается, что они действительно работают на практике. Подробное изучение этой темы в сфере авиации может позволить получить аналогичные результаты для атомной энергетики.

Риски, связанные с авариями на АЭС, возможно, излишне преувеличены по сравнению с теми рисками, которые касаются здоровья населения на фоне продолжающегося роста эмиссии вредных веществ станциями, работающими на ископаемом топливе.

В работе В.А. Грачёва описывается взаимосвязь между глобальными экологическими проблемами и здоровьем населения в контексте развития атомной энергетики [9]. Атомные электростанции не потребляют кислород и не осуществляют эмиссии парниковых газов. Европейские страны с высокоразвитой отраслью атомной энергетики признаны самыми экологически чистыми регионами Европы. В целом мировая атомная промышленность сокращает общемировой объем сжигания угля на 440 млн т. В России профессиональные заболевания не так часто встречаются в городах с ядерными объектами (как в России в целом). Тем не менее именно в этих городах обследования проводятся чаще и охватывают большее количество людей. Воздействие, связанное с эксплуатацией искусственных источников излучения, составляет 0,14%, а воздействие от атомных электростанций – 0,01% от общей дозы облучения, что в 100 раз ниже нормы (1 мЗв/год).

Необходимо отметить, что в общественном сознании риски для здоровья человека со стороны ядерной энергетики, по-видимому, систематически переоцениваются. Так, например, комплексное статистическое исследование медицинских радиологических последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, охватившее более 600 тыс. чел., показывает, что даже в наиболее загрязненных после аварии районах уровни заболеваемости раком щитовидной железы и солидным раком статистически не отличаются от среднероссийских показателей [10].

Производство и потребление энергии являются основой экономического и социального развития, а также проблемы изменения климата, поэтому энергетические вопросы играют решающую роль в устойчивом развитии [11]. Каждый источник энергии имеет свои преимущества и недостатки в отношении устойчивого развития. Сжигание ископаемого топлива является основной причиной загрязнения воздуха и риска изменения климата, вызванного деятельностью человека. Подавляющее большинство произведенной энергии приходится на ископаемое топливо (около 86%), что приводит к эмиссии большого количества парниковых газов, особенно в нефтяной и угольной промышленности. Интерес к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) в мире неуклонно растет, поскольку возобновляемые источники энергии вносят значительный вклад в глобальный энергетический баланс.

Недостатком ВИЭ является нестабильность производимой ими энергии, поэтому для ее компенсации необходима запасная мощность, которая в большинстве случаев генерируется на обычных электростанциях путем сжигания ископаемого топлива, что требует дополнительных инвестиций как для генерации, так и для транспортировки энергии. Сочетание возобновляемой энергии с газовыми электростанциями для резервного питания осуществляет выбросы парниковых газов, которые можно сравнить с отдельными угольными электростанциями с аналогичной мощностью. Именно поэтому возобновляемые

источники энергии не полностью удовлетворяют условиям устойчивого развития.

Атомная энергия в этом плане весьма конкурентоспособна, поскольку положительно влияет на изменение климата, и это позволяет сделать вывод о том, что в будущем она может стать самой привлекательной и доступной формой энергии для устойчивого развития. В то же время доля ядерной энергетики в мировом производстве энергии весьма мала, ее дальнейшее развитие зависит от прироста объема инвестиций в новые технологии, которого, увы, не ожидается в среднесрочной перспективе, отмечают авторы исследования [11]. Кроме того, в данной работе делается вывод, что наиболее перспективным направлением является комплексное функционирование традиционной органической энергии с ВИЭ и ядерной компонентой. С применением такого подхода мировая энергетическая промышленность будет развиваться как единый комплекс, позволяющий наилучшим образом использовать каждую технологию генерации энергии для обеспечения устойчивого развития на протяжении многих лет.

Бесспорно, достижение целей, установленных Парижским соглашением 2015 г., требует особого внимания к развитию атомной энергетики, гидроэлектроэнергетики и возобновляемых источников энергии. В странах, являющихся крупнейшими эмитентами парниковых газов, именно развитие атомной энергетики станет основной частью плана по сокращению выбросов соединений углерода [12]. Тем не менее в то время как азиатские страны планируют в перспективе все больше опираться на развитие атомной энергетики, европейские, напротив, ожидают, что ее роль будет уменьшаться, хотя признают необходимость существования атомной отрасли. Рассуждая о будущем ядерной энергии в странах мира, авторы исследования [12] пишут, что, хоть разные страны и имеют разные планы развития и сталкиваются с разными препятствиями на пути этого развития, основным требованием для воплощения ядерных планов будет их

совместное создание некой культуры безопасности, согласованной как можно большим количеством государств.

Роль международного сотрудничества в решении вопросов использования атомной энергии действительно велика, как отмечается в исследовании, посвященном анализу ядерной политики в России и странах, где к 2020-м гг. российской государственной корпорацией «Росатом» планируется строительство атомных электростанций – Финляндии и Венгрии [13]. ГК «Росатом» вместе со своими дочерними компаниями, другими государственными учреждениями и обширной сетью компаний и субъектов НИОКР осуществляет свою деятельность для поддержки российских ядерных энергетических проектов за рубежом. Преследуя свои внешнеполитические интересы и осуществляя модернизацию экономики за счет диверсификации ее экспортной структуры, Россия должна привлекать множество активов для преодоления структурных ограничений, с которыми сталкиваются государственные корпорации при развитии своих объектов в других странах. Важно, чтобы все подобные проекты соответствовали местным требованиям экологической безопасности. Пока что российской стороне успешно удается осуществлять свою деятельность в соответствии с интересами других стран, продвигая проекты атомных электростанций, что создает основу для укрепления международных связей в контексте развития «зеленой» энергетики.

Глобальное повышение температуры более чем на 2,5 °C увеличивает число людей с риском голода на 80 млн чел. [14]. Кроме того, недавние оценки показывают, что 25% млекопитающих мира и 12% птиц находятся под угрозой глобального исчезновения на фоне проблемы изменения климата. Основной причиной глобального потепления является увеличение выбросов диоксида углерода, которые являются результатом сжигания ископаемого топлива. Согласно данным исследований Калифорнийского университета, в структуре источников выбросов CO₂

присутствуют: транспорт (49%), генерация электроэнергии (30), промышленность (11), жилые дома (7) и коммерческие предприятия (3%). Существует глобальная резолюция о снижении выбросов углекислого газа, и один из практических подходов решения этой проблемы – сокращение выбросов CO₂ в секторе электроэнергетики.

У каждого из видов генерации энергии есть сильные и слабые стороны, но стоит больше ориентироваться на ядерную энергию, утверждает автор исследования [14], поскольку эмиссия CO₂ атомными станциями равна нулю. Следует добавить, что в большинстве стран существует налог на газ, например 3,4 долл. США за галлон в Великобритании и 2,53 долл. США за галлон – в Италии, поэтому ископаемое топливо является источником доходов для местных правительств, однако правительство все равно субсидирует атомную отрасль. В последние годы в некоторых странах было заявлено о налоге на производство, сопряженное с выбросами диоксида углерода, что можно расценивать как большой шаг к экономике, характеризующейся низким уровнем эмиссии углерода.

В связи с активным обсуждением проблемы сокращения эмиссии CO₂ высокий интерес представляет установление связи между выбросами диоксида углерода и их возможными причинами [15]. В этой работе используется комплексная модель, включающая в себя данные об экономическом росте, структуре промышленности, туристической отрасли, прямых иностранных инвестициях, использовании энергии, торговле и сельском хозяйстве по всему миру. Модель была построена с помощью обобщенного метода моментов на основе панельных данных по 168 странам за 24 года. Методом корреляционного анализа было проверено множество гипотез о влиянии множества факторов на объемы выбросов диоксида углерода. В частности, установлено, что развитие финансового сектора приводит к уменьшению загрязнения воздуха, а развитие международного туризма и торговли может

ухудшить состояние окружающей среды за счет роста содержания CO_2 в атмосфере. Наиболее интересный в контексте нашей темы исследования результат заключается в том, что развитие атомной электроэнергетики позволяет сократить эмиссию CO_2 , в то время как энергия, получаемая путем сжигания угля, увеличивает загрязнение окружающей среды. Данный вывод может показаться очевидным, однако в разрезе исследуемой темы интерес представляет сам факт существования статистических моделей, подтверждающих предположение о роли АЭС в решении проблемы глобального изменения климата.

Выводы о существенном превосходстве атомных электростанций в аспекте экологической эффективности также были подтверждены докладом ГК «Росатом» на IX международном общественном форуме-диалоге «Атомная энергия, общество, безопасность – 2014»⁴. Проанализировав содержание доклада с точки зрения сравнения атомной энергетики и ископаемого топлива, можно выделить основные экономические показатели энергоресурсов для каждого из двух рассматриваемых видов генерации электроэнергии (табл. 1).

Стоит отметить, что ядерная энергетика предпочтительнее генерации энергии путем сжигания угля как по показателю себестоимости производимой электроэнергии, так и – однозначно – по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу и риску профессиональной смертности. Капитальные затраты на создание атомных электростанций, бесспорно, велики, но, учитывая крайне высокую степень безопасности и экологичности, можно сказать, что параметр объема капитальных затрат имеет меньший вес, особенно в контексте решения проблемы глобального изменения климата.

Экспертные оценки экологической эффективности данных видов генерации

⁴ Грачёв В.А. Сравнение экологической эффективности различных источников энергии: материалы IX Международного общественного форума-диалога «Атомная энергия, общество, безопасность – 2014». М.: ГК «Росатом», 2014. URL: http://rosatom.ru/mediafiles/u/files/IX_forum_2014/Plenamoe/Grachev.pdf

энергии, представленные в упомянутом докладе, указывают на абсолютное превосходство атомной энергии над энергией, получаемой путем сжигания угля. Ядерная генерация электроэнергии характеризуется значительно большей степенью экологической эффективности в сравнении с угольной генерацией по следующим параметрам:

- количество выделяющихся парниковых газов;
- выброс вредных веществ в атмосферу;
- сброс вредных веществ в водные источники;
- образование отходов;
- выделение радиоактивных веществ в окружающую среду.

Стоит отметить, что по всем перечисленным технологическим критериям оценки экологической эффективности для угольной генерации электроэнергии свидетельствуют о крайней нежелательности массового использования энергии, получаемой путем сжигания ископаемого топлива, в контексте решения проблемы глобального изменения климата.

По состоянию на 2016 г., доля атомной энергетики в мировой генерации электроэнергии составляет около 4,5% (рис. 1). Несмотря на временное сокращение доли атомной энергетики в мировом потреблении энергии, нельзя не отметить роста ее абсолютного потребления. Так, например, за первое десятилетие XXI в. доля атомной энергетики сократилась с 6,22 до 5,14%, однако за тот же период потребление атомной энергии в мире выросло с 584,28 до 625,91 млн т в нефтяном эквиваленте, и эксперты прогнозируют дальнейший рост обоих показателей⁵.

Таким образом, наш анализ роли атомной энергетики в проблеме глобального изменения климата приводит к следующим выводам.

1. Теплоэлектростанции, работающие на ископаемом топливе (в частности, на угле), –

⁵ BP Energy Outlook: BP Statistical Review of World Energy, 2017 // Centre for Energy Economics Research and Policy, Heriot-Watt University. URL: <https://bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>

один из основных источников эмиссии CO_2 в атмосферу, что провоцирует «парниковый эффект», который, в свою очередь, является причиной глобального изменения климата. Кроме того, в противоположность радиоактивным отходам АЭС отходы угольных станций (зола) сбрасываются на площадку под открытым небом, что также сопряжено с экологическими рисками.

2. Атомные электростанции нейтральны по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу, отличаются высокой степенью экологической эффективности и существенно не влияют на углеродный баланс. Кроме того, стоит отметить, что экологическая безопасность при захоронении радиоактивных отходов обеспечивается соблюдением принципа многобарьерной защиты [16]. Можно сказать, что в общественном восприятии опасность атомной энергетики искусственно завышается, тогда как риски, связанные с гораздо более вредными и смертоносными явлениями (например, дорожно-транспортными происшествиями, промышленными выбросами предприятий в атмосферу и т.п.), считаются допустимыми.

Риски, связанные с атомной генерацией электроэнергии

Ядерная энергетика – одна из главных альтернатив традиционным ТЭЦ – в состоянии способствовать решению целого ряда глобальных экологических проблем. Как было отмечено ранее, по многим важным показателям, таким как, например, уровень выбросов углерода в атмосферу или даже количество выделения радиоактивных веществ, атомная станция выглядит намного более «зеленой» по сравнению с тепловой. Однако аварии различной степени опасности, происходившие за все время существования АЭС, широкая огласка их со стороны СМИ и, как следствие, широкий общественный резонанс заставляют большинство людей ассоциировать атомные реакторы с угрозой здоровью и даже жизни [17]. Кроме того, гонка вооружений, приведшая в середине XX в. к созданию атомных бомб, их многочисленным испытаниям и Карибскому

кризису, является ярким напоминанием об опасности, связанной с использованием энергии атома. Разобравшись в причинах крупнейших аварий и технических сбоев, можно оценить, оправдано ли столь осторожное отношение к атомной энергетике или же риски являются искусственно завышенными.

В табл. 2 представлен перечень наиболее масштабных и значительных аварий на атомных станциях. Уровень опасности катастроф в данном случае оценен по Международной шкале ядерных событий. Международная шкала ядерных событий (*International Nuclear Event Scale, INES*) разработана Международным агентством по атомной энергии в 1988 г. и с 1990 г. использовалась в целях единообразия оценки чрезвычайных случаев, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на атомных станциях, а позднее стала применяться ко всем установкам, связанным с гражданской атомной промышленностью.

По шкале INES ядерные и радиологические аварии и инциденты классифицируются по семи уровням, а также по следующим областям воздействия:

- население и окружающая среда – учитываются дозы облучения, полученные населением, а также выбросы радиоактивных материалов из установки;
- радиологические барьеры и контроль – учитываются события, не оказывающие прямого воздействия на население и окружающую среду и касающиеся только происходящего в пределах площадки ядерной установки. Сюда входят незапланированные высокие уровни облучения персонала и распространение значительных количеств радиоактивных веществ в пределах крупной ядерной установки, например АЭС;
- глубоко эшелонированная защита – учитываются события, связанные с тем, что комплекс мер, предназначенных для предотвращения аварий, не был реализован так, как это задумывалось.

Под оценку данной шкалы⁶ подпадают только радиоактивные утечки и нарушения мер безопасности, а не случаи переоблучения больных в результате процедур, военные инциденты и намеренные преступления.

Как видно из приведенных данных, на сегодняшний день только две аварии оценены по максимальному, седьмому уровню (Чернобыль и Фукусима), также одна авария оценена по шестому уровню опасности – это Кыштымская авария (ПО «Маяк»). Остальные аварии нельзя причислить к классу катастроф – они варьируются от серьезного инцидента (третий уровень) до аварий с широкими последствиями, что соответствует пятому уровню по шкале INES.

Проанализировав причины инцидентов, происходивших на атомных станциях, можно увидеть, что большая часть аварий и происшествий была вызвана ошибками сотрудников при обслуживании и эксплуатации АЭС. Человеческий фактор привел к нескольким серьезным последствиям, таким как авария в Токаймуре, возгорание на Сибирском химическом комбинате. Фатальная цепочка ошибок персонала привела к катастрофе на Чернобыльской АЭС.

Еще одной из причин происшествий можно считать недостаточное обслуживание систем охлаждения реакторов. Именно коррозия и технический отказ систем охлаждения, вовремя не установленных и не устраненных, вызвали взрывы на Кыштымской АЭС и в Три-Майл-Айленде.

В свою очередь, недавняя авария на АЭС Фукусима-1 могла быть предотвращена при более тщательном анализе зоны высокой сейсмической активности, в которой она была построена.

На фоне инцидентов, происходивших при эксплуатации атомных станций, ряд стран решил прекратить развертывание строительства атомных станций, при этом

сохраняя существующие мощности, либо полностью отказаться от данного вида энергии. Некоторые лидеры атомной энергетики (США, Франция, Япония) и отдельные страны закрыли ряд АЭС. К примеру, на сегодняшний день Италия стала единственной страной, закрывшей все имевшиеся АЭС и полностью отказавшейся от ядерной энергетики. При этом вопрос размещения мощностей, ранее вырабатывавшихся АЭС, в данных странах остается открытым.

Другие же государства, в число которых входит и Россия, продолжают развитие этой перспективной отрасли, видя в ней потенциал и возможность снижения экологической нагрузки [21]. На сегодняшний день атомная энергетика действительно является одной из наиболее вероятных и возможных альтернатив ТЭС, так как существенно не влияет на углеродный баланс в природе.

Еще один серьезный контрфактор при строительстве АЭС – это необходимость хранения ОЯТ (отработавшего ядерного топлива) и ядерных отходов. Однако риски при хранении ОЯТ и ядерных отходов минимальны, так как экологическая безопасность при захоронении радиоактивных отходов обеспечивается соблюдением принципа многобарьерной защиты. Сложная многоуровневая конструкция защищает от проникновения радиоактивных веществ в атмосферу, хранение в специализированных сертифицированных контейнерах также усиливает изоляцию, а постоянные замеры уровня радиоактивных веществ и излучения на поверхности обеспечивает непрерывный контроль безопасности.

Заключение

Возрастающий в последние годы интерес к использованию более экологичных видов генерации энергии обусловлен прежде всего наблюдающейся тенденцией изменения климата. За последнее столетие ускоряются темпы роста температуры воздуха на поверхности Земли, повышения среднего уровня моря, а также таяния арктических льдов, изменения кислотности океанических

⁶ ИНЕС. Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий / Международное агентство по атомной энергии. Вена, 2010. URL: <http://bnra.bg/bg/facilities/npp-events/ines-2008-r-web.pdf>

вод и изменения снежного покрова. Мировое сообщество пришло к выводу, что главной причиной глобальной перемены климата является изменение концентрации в атмосфере парниковых газов: углекислого газа, метана и оксидов азота.

Дальнейшее развитие ситуации в соответствии со сложившейся тенденцией может привести к долгосрочным деформациям во всех компонентах климатической системы, увеличивая вероятность наступления серьезных последствий для населения и всех экосистем нашей планеты. Единственный путь к решению проблемы глобального изменения климата в данном контексте – сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу, что поможет снизить риски, связанные с изменением климата, а также будет способствовать устойчивости развития экосистем.

Выводы об обозначенных проблемах и путях их решения были закреплены во многих международных соглашениях, в том числе в Парижских соглашениях 2015 г., основной целью которых является удержание степени прироста глобальной средней температуры. Существует множество механизмов снижения уровня выбросов парниковых газов, в том числе развитие атомной энергетики – как альтернативного источника генерации электроэнергии, отличающегося высокой экологической эффективностью. Таким образом, атомная энергетика является признанным рядом стран инструментом достижения целей Парижского соглашения.

Выводы о существенном превосходстве атомной энергии над энергией, получаемой путем сжигания угля, с точки зрения экологической эффективности, подтверждаются множеством научных исследований. Экспертные оценки представителей научного сообщества из разных стран мира степени экологичности и безопасности видов генерации электроэнергии позволяют сделать следующие выводы.

1. Теплоэлектростанции, работающие на угле, – это один из основных источников эмиссии CO_2 в атмосферу, что провоцирует

«парниковый эффект», который, в свою очередь, является причиной глобального изменения климата.

2. Атомные электростанции нейтральны по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу, отличаются высокой степенью экологической эффективности и существенно не влияют на углеродный баланс. Таким образом, можно сказать, что в общественном восприятии опасность атомной энергетики искусственно завышается.

Тем не менее широкий общественный резонанс, вызванный авариями различной степени опасности на атомных электростанциях по всему миру, привел к устойчивой ассоциации атомных реакторов с ненадежностью и угрозой жизни и здоровью. В целях опровержения этого утверждения был проведен сравнительный анализ причин и уровней опасности аварий на АЭС. Среди основных причин аварий, случившихся на атомных станциях за последние 65 лет, стоит отметить человеческий фактор, а также недостаточное обслуживание систем охлаждения реакторов станций. Установлено, что с развитием атомной энергетики конструкции АЭС были модернизированы в соответствии с технологическими недочетами, и это позволяет утверждать, что риски использования атомной энергии искусственно завышены.

В заключение можно сделать вывод, что при тщательном проектировании, учитывающем особенности среды для строительства и выверенной эксплуатации высококвалифицированными специалистами, атомные электростанции являются безопасным источником энергии, который в состоянии как обеспечить большие электрические мощности для потребления, так и значительно снизить экологическую нагрузку. За счет практически нулевого уровня выбросов парниковых газов в атмосферу АЭС в состоянии существенно повлиять на экологическую картину мира, что является крайне важной задачей в контексте решения проблемы глобального изменения климата.

Таблица 1**Основные экономические показатели энергоресурсов по видам генерации энергии****Table 1****Key economic indicators of energy resources by type of power generation**

| Показатель | Уголь | Ядерная энергия |
|---|-------|-----------------|
| Удельные капитальные затраты, долл. США/кВт | 1 300 | 2 200 |
| Себестоимость электроэнергии, цент/кВт·час | 3,25 | 2,6 |
| Выход CO ₂ , г/кВт | 251 | – |
| Выброс SO ₂ , мг/кВт·ч | 288 | – |
| Выбросы NO _x , мг/кВт·час | 516 | – |
| Риск профессиональной смертности, число смертей/ГВт/ч | 7 | 0,7 |

Источник: составлено авторами на основе данных доклада «Сравнение экологической эффективности различных источников энергии». URL: http://rosatom.ru/mediafiles/u/files/IX_forum_2014/Plenarnoe/Grachev.pdf

Source: Authoring, based on the report *Comparison of Environmental Efficiency of Various Sources of Energy*. URL: http://rosatom.ru/mediafiles/u/files/IX_forum_2014/Plenarnoe/Grachev.pdf (In Russ.)

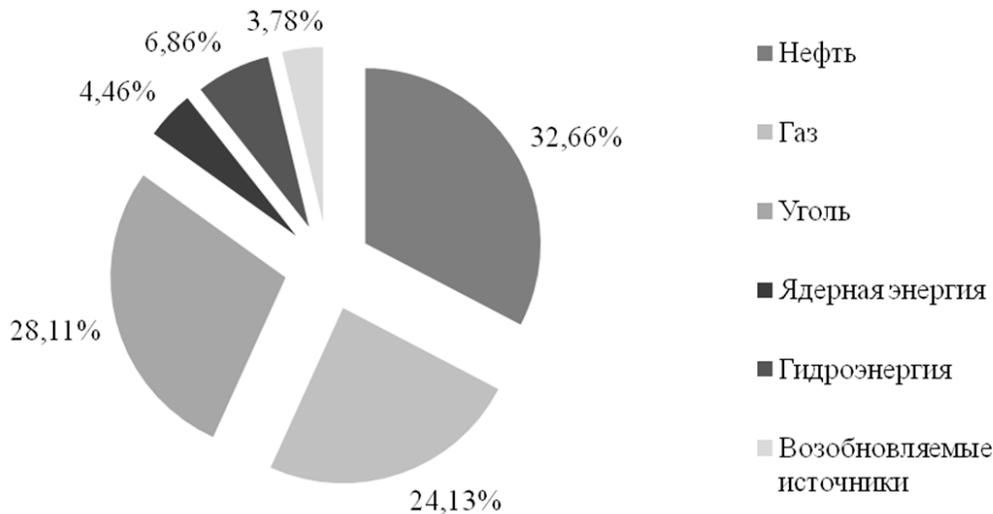
Таблица 2**Перечень катастроф на АЭС и их причины****Table 2****The list of catastrophes at nuclear power plants and their causes**

| Год | Страна, на территории которой произошла авария | Уровень опасности по шкале INES | Причина аварии |
|------|--|---------------------------------|--|
| 1952 | Чок-Риверская лаборатория, Канада | 5-й | н/д |
| 1957 | Кыштымская авария, СССР | 6-й | Нарушение системы охлаждения вследствие коррозии и выхода из строя средств контроля в одной из емкостей хранилища радиоактивных отходов. Это обусловило саморазогрев хранившихся высокоактивных отходов, что повлекло за собой взрыв [18] |
| 1957 | Уиндскейл, Великобритания | 5-й | Вследствие отсутствия контрольно-измерительных приборов и ошибок персонала процесс повторного разогрева графита для выделения энергии вышел из-под контроля. В результате слишком большого энерговыделения металлическое урановое топливо в одном из топливных каналов вступило в реакцию с воздухом и загорелось [19] |
| 1961 | SL-1, США | 5-й | При выполнении работ был по неуставленным причинам извлечен управляющий стержень, началась неуправляемая цепная реакция, топливо разогрелось до 2 000 °К, произошел тепловой взрыв, убивший троих сотрудников, расплавился реактор и был выброшен в атмосферу радиоактивный йод |
| 1979 | Три-Майл-Айленд, США | 5-й | Своевременно не обнаруженная утечка теплоносителя первого контура реакторной установки и, соответственно, потеря охлаждения ядерного топлива. В ходе аварии произошло расплавление около 50% активной зоны реактора, после чего энергоблок так и не был восстановлен |
| 1980 | Сен-Лоран-дез-О, Франция | 4-й | Частичное расплавление активной зоны, вызванное коррозией конструктивных элементов топливных каналов |

| | | | |
|------|---------------------------------------|-----|--|
| 1986 | Чернобыльская АЭС, СССР | 7-й | Авария явилась следствием маловероятного совпадения ряда нарушений правил и регламентов эксплуатационным персоналом, а катастрофические последствия приобрела из-за того, что реактор был приведен в нерегламентное состояние |
| 1989 | Вандельос, Испания | 3-й | В турбинном отделении произошел серьезный пожар, радиоактивные выбросы в окружающую среду при этом отсутствовали. Инцидент начался с разрушения одной из лопаток турбины, что привело к ее сильнейшей вибрации, возгоранию турбинного масла и водорода, охлаждающего турбогенератор |
| 1993 | Сибирский химический комбинат, Россия | 4-й | Причиной аварии считается недостаточная подача воздуха для перемешивания раствора, для обработки растворенных в концентрированной азотной кислоте урановых блоков. Оператор грубо нарушил технологический регламент, не выполнив перемешивания содержимого аппарата перед добавлением азотной кислоты и в течение двух последующих часов. В результате реакция концентрированной азотной кислоты с органикой перешла в неуправляемый автокаталитический режим, сопровождающийся резким повышением температуры [20] |
| 1999 | Токаймура, Япония | 4-й | За три года до аварии завод без согласования с Управлением науки и технологий самовольно изменил процедуру очистки. Работники вручную смешивали закись-окись урана и азотную кислоту в ведрах из нержавеющей стали, а не в предназначенном для этого резервуаре. В результате действий рабочих критическая масса ядерного топлива была существенно превышена и началась самоподдерживающаяся цепная реакция |
| 2011 | Фукусима-1, Япония | 7-й | При проектировании и строительстве АЭС, исходя из анализа известных случаев землетрясений и цунами, наблюдавшихся в регионе, в качестве возможных внешних воздействий на АЭС были приняты землетрясение магнитудой 8 и цунами с высотой волны 3,1 м. Не было заложено никакого запаса устойчивости АЭС на случай превышения расчетных показателей |

Источник: составлено авторами

Source: Authoring

Рисунок 1**Мировое потребление электроэнергии по видам генерации в 2016 г.****Figure 1****Global consumption of nuclear energy by power generation type in 2016**

Источник: составлено авторами на основе данных BP Statistical Review of World Energy, 2017

Source: Authoring, based on BP Statistical Review of World Energy, 2017

Список литературы

1. Guillet S., Corona C., Stoffel M. et al. Climate Response to the Samalas Volcanic Eruption in 1257 Revealed by Proxy Records // *Nature Geoscience*. 2017. No. 10. P. 123–128.
URL: <http://doi.org/10.1038/NGEO2875>
2. Porfiriev B. Climate Change: A Hazard or an Opportunity? // *Environmental Hazards*. 2009. Vol. 8. Iss. 3. P. 167–170. URL: <http://doi.org/10.3763/ehaz.2009.0026>
3. Mendelsohn R. The Role of Markets and Governments in Helping Society Adapt to a Changing Climate // *Climatic Change*. 2006. Vol. 78. Iss. 1. P. 203–215.
URL: <http://doi.org/10.1007/s10584-006-9088-4>
4. Porfiriev B. Climate Change as a Major Slow-Onset Hazard to Development: An Integrated Approach to Bridge the Policy Gap // *Environmental Hazards*. 2015. Vol. 14. Iss. 2. P. 187–191.
URL: <http://doi.org/10.1080/17477891.2015.1019823>
5. Порфирьев Б.Н., Катцов В.М., Рогинко С.А. Изменения климата и международная безопасность. М.: Д'АРТ, 2011. 290 с.
6. Сафонов Г.В. Борьба с глобальным изменением климата: перспективы для развития возобновляемой энергетики в России // *Форсайт*. 2007. № 3. С. 12–17.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/borba-s-globalnym-izmeneniem-klimata-perspektivy-dlya-razvitiya-vozobnovlyaemoy-energetiki-v-rossii>
7. Roberts J.W. If Nuclear Energy Is the Answer, Why Doesn't Everyone Agree? // *Physics Education*. 2018. Vol. 53. Iss. 2. URL: <http://doi.org/10.1088/1361-6552/aa9f7c>
8. Downer J. The Aviation Paradox: Why We Can 'Know' Jetliners But Not Reactors // *Minerva*. 2017. Vol. 55. Iss. 2. P. 229. URL: <http://doi.org/10.1007/s11024-017-9322-4>

9. *Грачев В.А.* Взаимосвязь глобальных экологических проблем здоровья населения и развития атомной энергетики // *Экология человека*. 2018. № 2. С. 9–15.
10. *Ivanov V., Tsyb A., Ivanov S., Pokrovsky V.* Medical Radiological Consequences of the Chernobyl Catastrophe in Russia: Estimation of Radiation Risks. St. Petersburg: Nauka Publ., 2004. 388 p.
11. *Жизнин С., Тимохов В.* Влияние энергетики на устойчивое развитие // *Мировая экономика и международные отношения*. 2017. № 11. С. 34–42.
12. *May M.M.* Safety First: The Future of Nuclear Energy outside the United States // *Bulletin of the Atomic Scientists*. 2016. Vol. 73. Iss. 1. P. 38–43.
URL: <http://doi.org/10.1080/00963402.2016.1264210>
13. *Aalto P., Nyysönen H., Kojo M., Pal P.* Russian Nuclear Energy Diplomacy in Finland and Hungary // *Eurasian Geography and Economics*. 2017. Vol. 58. Iss. 4. P. 386–417.
URL: <http://doi.org/10.1080/15387216.2017.1396905>
14. *Hejazi R.* Nuclear Energy: Sense or Nonsense for Environmental Challenges // *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2017. Vol. 6. Iss. 2. P. 693–700.
URL: <http://doi.org/10.1016/j.ijse.2017.07.006>
15. *Balogh J.M., Jámbor A.* Determinants of CO₂ Emission: A Global Evidence // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2017. Vol. 7. No. 5. P. 171–177.
16. *Петренко А.В.* Перспективы атомной энергетики. На смену углеводородам // *Российское предпринимательство*. 2008. № 12-2. С. 85–89.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/perspektivy-atomnoy-energetiki-na-smenu-uglevodorodam>
17. *Саркисов А.А.* Феномен восприятия общественным сознанием опасности, связанной с ядерной энергетикой // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2012. № 3-2. С. 9–21.
18. *Толстиков В.Г.* Ядерная катастрофа 1957 года на Урале // *Magistra Vitae*. 1999. № 1. С. 86–95.
19. *Penney W., Schonland B.F.J., Kay J.M. et al.* Report on the accident at Windscale No. 1 Pile on 10 October 1957 // *Journal of Radiological Protection*. 2017. No. 37. P. 780–796.
URL: <http://doi.org/10.1088/1361-6498/aa7788>
20. *Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др.* Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. 751 с.
21. *Черняховская Ю.В.* Выбросы парниковых газов в электроэнергетике и их снижение от внедрения российских проектов атомных электростанций // *Вестник МЭИ*. 2017. № 3. С. 46–52.

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

ECONOMIC ASPECTS OF NUCLEAR POWER ENGINEERING INVOLVED TO ADDRESS ISSUES OF GLOBAL CLIMATE CHANGE

Ekaterina D. IVANTSOVA^{a*}, Yuliya S. TSYRO^b, Anton I. PYZHEV^c

^a Siberian Federal University (SibFU), Krasnoyarsk, Russian Federation
e.d.iv@ya.ru
ORCID: not available

^b Siberian Federal University (SibFU), Krasnoyarsk, Russian Federation
juliatsyro@mail.ru
ORCID: not available

^c Siberian Federal University (SibFU), Krasnoyarsk, Russian Federation
pyanist@ya.ru
ORCID: not available

* Corresponding author

Article history:

Received 24 May 2018
Received in revised form
12 June 2018
Accepted 3 July 2018
Available online
14 September 2018

JEL classification: Q48, Q53,
Q54

Keywords: nuclear power,
global climate change,
environmental efficiency,
low-carbon economy, natural
hazard, manmade hazard

Abstract

Importance This article considers the possibility of solving the issue by developing nuclear energy as an alternative source of electricity generation, which is characterized by high environmental efficiency.

Objectives We conduct our own comprehensive study into nuclear energy use to solve the global climate change problem, assess nuclear energy risks through a retrospective analysis of the industry development.

Methods The research involves methods of comparative analysis and an integrated survey of the research area.

Results Nuclear energy has no effect on the carbon balance, which is proved by the results of a comparative analysis of various electricity generation characteristics. Nuclear energy risks were found to be artificially overestimated.

Conclusions and Relevance If thoroughly designed and properly operated by high professionals, nuclear power plants are a safe source of energy, which is capable of ensuring high electricity supply, thus substantially reducing the environmental footprint. Whereas electric power plants almost do not exhaust greenhouse gas, they are able to reshape the global environmental landscape.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2018

Please cite this article as: Ivantsova E.D., Tsyro Yu.S., Pyzhev A.I. Economic Aspects of Nuclear Power Engineering Involved to Address Issues of Global Climate Change. *National Interests: Priorities and Security*, 2018, vol. 14, iss. 9, pp. 1632–1648.
<https://doi.org/10.24891/ni.14.9.1632>

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research as part of Scientific Project № 16-55-76012, grant of the RF President as the State aid to young scholars of Russia № MK-3482.2018.6 and Green Square Project of the ROSATOM Community Board.

References

1. Guillet S., Corona C., Stoffel M. et al. Climate Response to the Samalas Volcanic Eruption in 1257 Revealed by Proxy Records. *Nature Geoscience*, 2017, no. 10, pp. 123–128.
URL: <http://doi.org/10.1038/NGEO2875>

2. Porfiriev B. Climate Change: A Hazard or an Opportunity? *Environmental Hazards*, 2009, vol. 8, iss. 3, pp. 167–170. URL: <http://doi.org/10.3763/ehaz.2009.0026>
3. Mendelsohn R. The Role of Markets and Governments in Helping Society Adapt to a Changing Climate. *Climatic Change*, 2006, vol. 78, iss. 1, pp. 203–215. URL: <http://doi.org/10.1007/s10584-006-9088-4>
4. Porfiriev B. Climate Change as a Major Slow-Onset Hazard to Development: An Integrated Approach to Bridge the Policy Gap. *Environmental Hazards*, 2015, vol. 14, iss. 2, pp. 187–191. URL: <http://doi.org/10.1080/17477891.2015.1019823>
5. Porfir'ev B.N., Katsov V.M., Roginko S.A. *Izmeneniya klimata i mezhdunarodnaya bezopasnost'* [Climate change and international security]. Moscow, D'ART Publ., 2011, 290 p.
6. Safonov G.V. [The struggle against global warming: The prospects for renewable energy sources in Russia]. *Forsait = Foresight and STI Governance*, 2007, no. 3, pp. 12–17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/borba-s-globalnym-izmeneniem-klimata-perspektivy-dlya-razvitiya-vozobnovlyayaemoy-energetiki-v-rossii> (In Russ.)
7. Roberts J.W. If Nuclear Energy Is the Answer, Why Doesn't Everyone Agree? *Physics Education*, 2018, vol. 53, no. 2. URL: <http://doi.org/10.1088/1361-6552/aa9f7c>
8. Downer J. The Aviation Paradox: Why We Can 'Know' Jetliners But Not Reactors. *Minerva*, 2017, vol. 55, iss. 2, p. 229. URL: <http://doi.org/10.1007/s11024-017-9322-4>
9. Grachev V.A. [The relationship between global environmental problems, population health, and development of nuclear power industry]. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*, 2018, no. 2, pp. 9–15. (In Russ.)
10. Ivanov V., Tsyb A., Ivanov S., Pokrovsky V. Medical Radiological Consequences of the Chernobyl Catastrophe in Russia: Estimation of Radiation Risks. St. Petersburg, Nauka Publ., 2004, 388 p.
11. Zhiznin S., Timokhov V. [Energy impact on sustainable development]. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya = World Economy and International Relations*, 2017, no. 11, pp. 34–42. (In Russ.)
12. May M.M. Safety First: The Future of Nuclear Energy Outside the United States. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2016, vol. 73, iss. 1, pp. 38–43. URL: <http://doi.org/10.1080/00963402.2016.1264210>
13. Aalto P., Nyysönen H., Kojo M., Pal P. Russian Nuclear Energy Diplomacy in Finland and Hungary. *Eurasian Geography and Economics*, 2017, vol. 58, iss. 4, pp. 386–417. URL: <http://doi.org/10.1080/15387216.2017.1396905>
14. Hejazi R. Nuclear Energy: Sense or Nonsense for Environmental Challenges. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017, vol. 6, iss. 2, pp. 693–700. URL: <http://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.07.006>
15. Balogh J.M., Jámbor A. Determinants of CO₂ Emission: A Global Evidence. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 171–177.
16. Petrenko A.V. [Perspectives of nuclear energy. Replacing hydrocarbons]. *Rossiiskoe predprinimatel'stvo = Russian Journal of Entrepreneurship*, 2008, no. 12-2, pp. 85–89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/perspektivy-atomnoy-energetiki-na-smenu-uglevodorodam> (In Russ.)

17. Sarkisov A.A. [The phenomenon of public perception of nuclear hazards]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki = St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*, 2012, no. 3-2, pp. 9–21. (In Russ.)
18. Tolstikov V.G. [The nuclear catastrophe of 1957 in the Urals]. *Magistra Vitae*, 1999, no. 1, pp. 86–95. (In Russ.)
19. Penney W., Schonland B.F.J., Kay J.M. et al. Report on the Accident at Windscale No. 1 Pile on 10 October 1957. *Journal of Radiological Protection*, 2017, no. 37, pp. 780–796.
URL: <http://doi.org/10.1088/1361-6498/aa7788>
20. Aleksakhin R.M., Buldakov L.A., Gubanov V.A. et al. *Krupnye radiatsionnye avarii: posledstviya i zashchitnye mery* [Major radiation accidents: Consequences and protective measures]. Moscow, Izdat Publ., 2001, 751 p.
21. Chernyakhovskaya Yu.V. [Greenhouse gas emissions in the electric power sector and their abatement due to Russian NPP Projects]. *MPEI Vestnik*, 2017, no. 3, pp. 46–52. (In Russ.)

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.