

## Проблемы управления: теория и практика Administrative problems: theory and practice

Горин Н.В., Головихина О.С. Глазов Е.Е., Екидин А.А., Нечаева С.В.

### Информирование населения как инструмент развития атомной отрасли

*Горин Николай Владимирович* — кандидат физико-математических наук, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская область, РФ.

E-mail: [n.gorin@vniitf.ru](mailto:n.gorin@vniitf.ru)

SPIN-код РИНЦ: [8826-7307](#)

ORCID ID: [0000-0001-7468-1492](#)

*Головихина Ольга Сергеевна* — советник, ФГУП «НО РАО», Москва, РФ.

E-mail: [OSGolovikhina@rosatom.ru](mailto:OSGolovikhina@rosatom.ru)

SPIN-код РИНЦ: [3121-8253](#)

ORCID ID: [0000-0002-2552-4586](#)

*Глазов Егор Евгеньевич* — бакалавр, факультет управления и политики, МГИМО МИД России, Москва, РФ.

E-mail: [egorglazov1999@mail.ru](mailto:egorglazov1999@mail.ru)

SPIN-код РИНЦ: [8096-8139](#)

ORCID ID: [0000-0003-1858-3614](#)

*Екидин Алексей Акимович* — кандидат физико-математических наук, ФГБУН «ИПЭ УрО РАН», Екатеринбург, РФ.

E-mail: [ekidin@ecko.uran.ru](mailto:ekidin@ecko.uran.ru)

SPIN-код РИНЦ: [8795-3160](#)

ORCID ID: [0000-0002-1204-5949](#)

*Нечаева Светлана Владимировна* — кандидат исторических наук, доцент, ЧФ РАНХиГС, Челябинск, РФ.

E-mail: [nechaeva@chel.ranepa.ru](mailto:nechaeva@chel.ranepa.ru)

SPIN-код РИНЦ: [2342-4497](#)

ORCID ID: [0000-0003-3400-8628](#)

#### Аннотация

Настоящей статьей авторы стремятся привлечь внимание научной общественности к назревшей необходимости изменить отношение общества к атомной отрасли за счет расширения информационной работы с населением в интересах развития отрасли. Это позволит ответить на один из основных вызовов современности — экологическое загрязнение планеты и глобальное потепление, усиливающееся в результате техногенной деятельности. На примере обращения с гексафторидом урана предложены аргументы для общественных обсуждений в любых форматах проблем атомной отрасли, в том числе в части обеспечения ураном энергетики с замкнутым топливным циклом и рециклингом, позволяющими на два порядка расширить топливную базу и снизить масштаб отходов. Реакция на вызов станет особо актуальной в течение ближайших десятилетий, и поэтому заранее необходима работа с молодежью и школьниками, которые в недалеком будущем будут определять пути развития страны, став активными участниками процессов социального развития. Высказан прогноз, что в ближайшем будущем наиболее востребованным товаром на мировом рынке будет не углеводородный энергоноситель, а уран. Вычислена цена накопленного обедненного гексафторида урана в единицах энергии, которые принципиально неизменны. Показано, что накопленные к настоящему времени запасы урана ядерной чистоты в виде гексафторида — уже готовый энергоноситель, который содержит энергию на сотню лет для современной цивилизации. Предложенные аргументы следует использовать в информационной работе с молодежью и школьниками, с авторитетными группами населения и всем населением. Широкое информирование позволит воспитать более доверительное отношение населения к атомной энергетике и отрасли, которое станет одной из движущих сил их развития.

**Ключевые слова**

Экология, глобальное потепление, гексафторид урана, гражданское общество, общественность, общественные организации.

DOI: 10.24412/2070-1381-2021-85-6-24

*Gorin N.V., Golovikhina O.S. Glazov Y.E., Ekin A.A., Nechaeva S.V.*

**Awareness-Raising as a Tool in Developing the Atomic Industry**

*Nikolay V. Gorin* — PhD, FSUE “Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation.

E-mail: [n.gorin@vniitf.ru](mailto:n.gorin@vniitf.ru)

ORCID ID: [0000-0001-7468-1492](https://orcid.org/0000-0001-7468-1492)

*Olga S. Golovikhina* — Councilor, National Operator for radioactive Waste Management FSUE, Moscow, Russian Federation.

E-mail: [OSGolovikhina@rosatom.ru](mailto:OSGolovikhina@rosatom.ru)

ORCID ID: [0000-0002-2552-4586](https://orcid.org/0000-0002-2552-4586)

*Yegor E. Glazov* — Bachelor student, School of Governance and Politics, MGIMO University, Moscow, Russian Federation.

E-mail: [egorglazov1999@mail.ru](mailto:egorglazov1999@mail.ru)

ORCID ID: [0000-0003-1858-3614](https://orcid.org/0000-0003-1858-3614)

*Aleksey A. Ekin* — PhD, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation.

E-mail: [ekidin@ecko.uran.ru](mailto:ekidin@ecko.uran.ru)

ORCID ID: [0000-0002-1204-5949](https://orcid.org/0000-0002-1204-5949)

*Svetlana V. Nechaeva* — PhD, Associate Professor, Chelyabinsk Branch of Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Chelyabinsk, Russian Federation.

E-mail: [nechaeva@chel.ranepa.ru](mailto:nechaeva@chel.ranepa.ru)

ORCID ID: [0000-0003-3400-8628](https://orcid.org/0000-0003-3400-8628)

**Abstract**

In the present paper, the authors aim at focusing the scientific community on the urgent needs to change the public attitudes towards the atomic industry. One of the possible ways to achieve this aim is to increase the scope of the outreach in support of the industry development. This will be a response to one of the major challenges of the day: environmental pollution of the planet and global warming that are aggravated even further by the impact of human activity. Uranium hexafluoride handling was used as an example to adduce arguments for any form of public debates on the nuclear industry issues including supply of uranium for energy production with closed fuel cycle and recycling. This makes it possible to increase the fuel resources by two orders of magnitude and reduce the amount of wastes. The response to the challenge will become of particular relevance during a period of several decades, therefore the appropriate awareness-raising activities involving young people and students should be initiated in advance because they will become active participants of social development and determine the growth area of their country in the nearest future. It was forecasted that in the near term, uranium rather than hydrocarbon energy carrier would become the most commercially successful product. The price of the accumulated depleted hexafluoride using the energy units that remain virtually unchanged is calculated. It is also demonstrated that the available accumulated resources of the nuclear-purity uranium in the form of hexafluoride can be regarded as a ready-to-use energy carrier capable of meeting a modern civilization need in energy for a century. The arguments proposed should be used in the outreach focused on the young people and students, the influential groups and all the population. Greater awareness-raising will facilitate the needed social attitude towards the nuclear energy and the atomic industry that will further emerge as a driving force for their development.

**Keywords**

Ecology, global warming, uranium hexafluoride, civil society, public, public organizations.

DOI: 10.24412/2070-1381-2021-85-6-24

### **Введение**

Уровень развития современной цивилизации, ее численность и материальные блага стали возможны благодаря достижениям человеческой деятельности в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, образовании, культуре, вообще во всех науках и областях деятельности, но самое главное — в энергетике. Если мысленно уменьшить в несколько раз долю современной углеводородной энергетики, а она составляет ~80%, то можно прогнозировать резкий спад производства, сокращение продолжительности жизни и численности населения. Однако за малую долю экологически чистой энергетики приходится расплачиваться загрязнением окружающей среды, возможно, ростом парникового эффекта и глобальным потеплением<sup>1</sup>.

Большинство населения поддерживает развитие экологически чистой солнечной и ветровой энергетики, полагая, что именно они могут решить все современные энергетические и экологические проблем, но специалистами предлагается единственно возможный способ решения за счет развития атомной энергетики<sup>2</sup> с реакторами на быстрых нейтронах [Пономарев-Степной 2016]. Другой экологически чистой энергетики, способной производить энергию в необходимых масштабах, пока нет [Панченко и др. 2015]. Из-за страха у населения, вызванного прошлыми авариями и недостаточным уровнем радиационной грамотности, ядерная отрасль все еще не сумела добиться лояльного отношения к себе даже в странах, развивавших атомную энергетику. Достижение доверия — определяющий фактор востребованности обществом развития ядерных технологий. Для развития атомной энергетики необходимо сформировать востребованное отношение населения к атомной энергии, когда население потребует от власти строить именно атомную станцию, а не углеводородную. Молчаливого согласия в настоящее время слишком мало. Для востребованного отношения необходима уверенность населения в безопасности и неизбежности ядерных технологий, то есть необходимо радиационно-грамотное население, формирование которого следует начинать в школьном возрасте [Горин и др. 2018а; 2018б; Головихина и др. 2018]. Востребованное отношение населения к атомной энергетике и отрасли может стать одной из движущих сил их развития, однако общество пока не определилось со своим отношением к атомной отрасли [Мельникова и др. 2018, 8].

---

<sup>1</sup> Climate Change 2014: Synthesis Report. Summary for Policymakers // IPCC [Электронный ресурс]. URL: [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf) (дата обращения: 13.01.2021).

<sup>2</sup> Без ядерной энергетики у нынешней цивилизации нет будущего // Атомный эксперт [Электронный ресурс]. URL: <https://atomicexpert.com/page3177835.html> (дата обращения: 13.01.2021); *Катица П.Л.* Энергия и физика (доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР, Москва, 8 октября 1975 г.) // Aftershock [Электронный ресурс]. URL: <https://aftershock.news/?q=node/619844> (дата обращения: 13.01.2021).

Развитие атомной отрасли затрагивает интересы большинства населения, и ожидания заинтересованных сторон (разных групп населения) должны учитываться в процессах управления отраслью. Основные требования прописаны в нормах МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды<sup>3</sup>. Предварительно следует определить заинтересованные стороны, их ожидания и обеспечить приоритет безопасности над всеми другими потребностями, особенно в случае если ожидания различных сторон противоречивы.

Искаженные оценки в восприятии населением радиационной опасности и риска основаны на недостаточном уровне базовых знаний о воздействии радиации на окружающую среду и здоровье человека. Они формируются на основе мнений авторитетных категорий населения (учителей, врачей, журналистов, представителей региональных властей и местных органов власти), а также средств массовой информации и имеют место практически во всех регионах Российской Федерации, а не только в местах размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов. Особо существенную, а порой и негативную роль в формировании общественного мнения могут играть средства массовой информации, социальные сети и блогеры.

Работа с общественностью предусмотрена российским законодательством<sup>4</sup> и рядом международных документов<sup>5</sup>, для ее эффективности аргументация должна быть очень простой, наглядной, запоминающейся и применима во всех очных и дистанционных форматах взаимодействия: на общественных слушаниях, круглых столах разного уровня, публичных лекциях, в материалах на сайтах и пр. [Горин и др. 2020]. На основании опыта диалогов с общественностью по обеспечению безопасного обращения с обедненным гексафторидом урана (ОГФУ) предлагается ряд аргументов, которые будут полезны в дискуссиях с общественными организациями и населением для формирования конструктивного отношения к развитию ядерных технологий.

---

<sup>3</sup> Система управления для ядерных установок. Руководство по безопасности № GS-G-3.5. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды // IAEA [Электронный ресурс]. URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1392r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1392r_web.pdf) (дата обращения: 13.01.2021).

<sup>4</sup> Федеральный закон «Об экологической экспертизе» № 174-ФЗ от 23.11.1995 // КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_8515/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8515/) (дата обращения: 13.01.2021); Постановление правительства «Об утверждении положения о проведении государственной экологической экспертизы» ПП РФ № 1796 от 07.11.2020 // Сайт Правительства РФ [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/all/130801/> (дата обращения: 13.01.2021); Приказ Госкомэкологии РФ № 372 от 16.05.2000 «Об утверждении Положения об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в Российской Федерации» // КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_27864/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_27864/) (дата обращения: 13.01.2021).

<sup>5</sup> Конвенция об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте // ООН [Электронный ресурс]. URL: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/env\\_assessment.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/env_assessment.shtml) (дата обращения: 13.01.2021).

Ниже рассмотрено современное энерго-экологическое положение и высказан прогноз, что в ближайшем будущем наиболее востребованным товаром на мировом рынке будет не углеводородный энергоноситель, а уран; вычислена цена накопленного ОГФУ, но не в денежных единицах, которые могут изменяться в результате каких-либо глобальных общественно-политических событий, а в единицах энергии (например, в джоулях), которые принципиально неизменны. Показано, что ОГФУ — это стратегический запас и ценное сырье для будущих поколений, что в накопленном уране ядерной чистоты заключена энергия, в сто раз превосходящая годовые потребности человечества, причем примерно половина этого запаса накоплена в России. Обсуждена проблема радиоактивных отходов (РАО), и показано, что их объем мал и специалисты Госкорпорации (ГК) «Росатом» их надежно контролируют.

Использование приведенных аргументов поможет изменить отношение населения не только к проблемам обращения с ОГФУ, но и ко всей отрасли и способствовать ее развитию.

#### ***Общественные экологические организации и диалог о безопасности развития атомной отрасли***

В конце 2019 года в российских и зарубежных СМИ и социальных сетях получили широкое распространение публикации о ввозе на территорию России ядерных отходов. Публикации не соответствовали действительности и формировались с использованием комментариев протестно настроенных общественных экологических организаций, представлявших искаженные данные о реальном положении дел. Экологические НКО публично выступали против ввоза ОГФУ в Россию, так как, по их мнению, процесс обогащения являлся нецелесообразным и вредным для окружающей среды и здоровья человека. Экологи отмечали и отсутствие возможности для открытого осмотра мест по хранению и обращению с ОГФУ.

Теме ввоза ОГФУ были посвящены заседания Общественного совета ГК «Росатом»<sup>6</sup>, на которых были рассмотрены все аспекты безопасности обращения с ОГФУ, предоставлен расчет рисков непредвиденных ситуаций, экономическая, технологическая и экологическая целесообразность процесса дообогащения, обозначены намерения «Росатома» обеспечить общественный контроль за соблюдением

---

<sup>6</sup> Протокол заседания Общественного совета Госкорпорации «Росатом» от 12 ноября 2019 // Росатом [Электронный ресурс]. URL: <https://osatom.ru/plan/45> (дата обращения: 13.01.2021); Протокол заседания Общественного совета Госкорпорации «Росатом» от 17 декабря 2019 // Росатом [Электронный ресурс]. URL: <https://osatom.ru/plan/46> (дата обращения: 13.01.2021).

экологической и радиационной безопасности при обращении с ОГФУ. В ответ на запросы общественных экологических организаций были организованы технические туры для СМИ, представителей общественности на АО «Уральский электрохимический комбинат», АО «ПО Электрохимический завод», где осуществляется хранение и переработка ОГФУ. Госкорпорацией «Росатом» были приняты меры по повышению уровня информирования населения по вопросу ОГФУ.

Диалог, организованный в ответ на запрос общественных организаций, был регулярным и всесторонним. В результате стороны, конструктивно подошедшие к решению вопроса, готовые к взаимодействию, пришли к консенсусу: дообогащение урана целесообразно и не представляет опасности, что в дальнейшем было отражено в докладе эколого-правового центра «Беллона» об ОГФУ<sup>7</sup>. Итогом работы общественности, Госкорпорации «Росатом», органов региональной и муниципальной власти стало составление «Программы Госкорпорации «Росатом» по безопасному обращению с ОГФУ», при подготовке которой были рассмотрены предложения всех участников дискуссии.

### ***Особенности обсуждений с общественностью***

При подготовке к обсуждению следует понимать, что не существует какого-либо единственного универсального аргумента, знакомство с которым автоматически переведет слушателя в разряд «радиационно-грамотного». Но, с другой стороны, и не требуется специализированный институтский курс радиационной безопасности; опыт показывает, что обычной беседы в пределах школьного урока будет достаточно, естественно, при условии, что истинная информация целенаправленно подобрана и доложена слушателям.

Знания, направленные на преодоление радиофобии и поддержку атомной отрасли, должны основываться на простых сведениях о том, что:

- жизнь на планете зародилась, сформировалась и развивается в условиях природной радиации, а естественный радиационный фон (ЕРФ) не зависит от человеческой деятельности;
- экологическая обстановка на планете уже нарушена всем ходом человеческой истории и это «плата за цивилизацию», за уровень и продолжительность жизни, безопасность государств, транспорт, рабочие

---

<sup>7</sup> Никитин А.К. Муратов О.Э., Вахрушева К.В. Обедненный гексофторид урана: современная ситуация, вопросы безопасного обращения и перспективы // Росатом [Электронный ресурс]. URL: [https://rosatom.ru/ogfu\\_report\\_2020.pdf](https://rosatom.ru/ogfu_report_2020.pdf) (дата обращения: 13.01.2021).

места, жилье и численность населения. Для ~7–10 млрд чел. населения углеводородная энергетика становится уже неприемлемой по экологическим соображениям;

- возобновляемые источники энергии не обеспечат потребности цивилизации из-за низкой плотности потока энергии, сделать это может только атомная энергетика, она имеет недостатки, но у углеводородной энергетике их гораздо больше;
- из всех аварий в ядерной отрасли сделаны выводы, пересмотрены стандарты безопасности, найдены новые технические решения, и в результате повышена безопасность как работающих блоков, так и энергетических реакторов следующего поколения;
- любую радиационную величину, например мощность дозы излучения, о которой сообщают в СМИ, всегда необходимо сравнивать с ЕРФ, и вполне возможно, что это воздействие не превышает фона.

Специалисту, подготавливающему аргументы слушателям без специального образования, следует руководствоваться фразой А. Эйнштейна «...если вы что-то не можете объяснить шестилетнему ребенку, вы сами этого не понимаете...» и помнить, что если информация проста, кратка, убедительна и наглядна, то, скорее всего, этого будет достаточно.

### ***Современная энерго-экологическая ситуация***

В настоящее время доля углеводородных энергоносителей в мировом балансе составляет около 90%, причем ~10% из них приходится на биотопливо, остальное — на атомную энергетiku (~5%), гидроэнергетику (~2,5%) и ~2% на возобновляемые источники энергии (солнечная и ветровая энергетика). Таким образом, человечество использует энергию, сосредоточенную в атомах вещества и высвобождаемую при реакции окисления (горения) углеводородов. Однако известно, что запасы энергии на Земле сосредоточены не в атомах, а в ядрах и она может высвободиться в реакциях деления (атомная энергетика) или синтеза (термоядерная энергетика).

Структура энергетических ресурсов России иллюстрируются Таблицей 1, где показаны потенциальные запасы энергии, сосредоточенные в ядрах, к освоению которой человечество приступило лишь несколько десятилетий назад, и в существенно меньших масштабах в молекулах и атомах, которая освоена за тысячелетия человеческой истории. При анализе данных Таблицы 1 следует учитывать, что информация о запасах тория и

лития по разным литературным источникам заметно различается, но даже в условиях неопределенности запас современных углеводородных источников находится на уровне единиц процентов.

**Таблица 1. Потенциальные запасы энергии<sup>8</sup>**

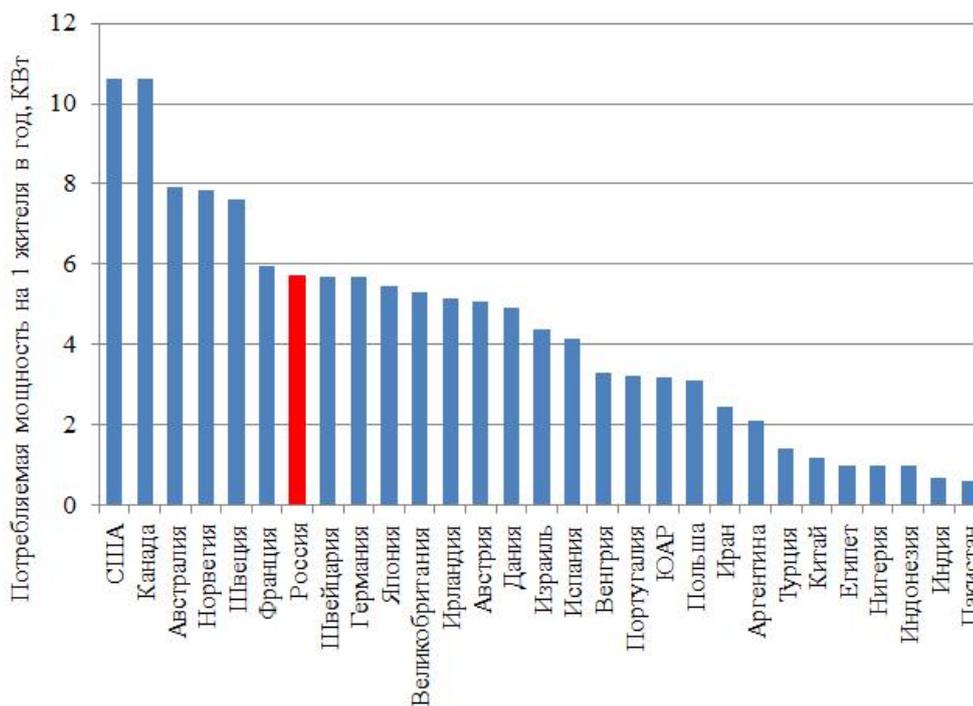
Энергия деления тория-232	43%
Энергия деления урана-238	16%
Энергия в термоядерной реакции (t,d) трития, получаемого из Li <sup>6</sup>	39%
Энергия деления урана-235	~0,1%
Энергия современных углеводородных источников, в том числе:	~1,9%
нефть	~0,2%
газ	~0,4%
уголь	~1,3%

Видно, что «век нефти» соизмерим с «веком урана» и, перед тем как закончится нефть, будут исчерпаны запасы урана-235, обеспечивающего работы атомной энергетики на тепловых нейтронах.

В настоящее время человечество ежегодно добывает углеводородные энергоносители<sup>9</sup> ~14,1 миллиардов тонн нефтяного эквивалента (млрд т. н.э.), сжигает их и производит ~ $6 \cdot 10^{20}$  Дж энергии [Прогноз развития энергетики мира и России 2019], что соответствует мощности ~19 тыс. ГВт, и, следовательно, на одного жителя планеты (~7,2 млрд чел.) приходится ~2,6 кВт. Энергия между странами распределяется неравномерно: так, разница в потреблении между Норвегией, Канадой и Швецией, то есть странами с высоким уровнем жизни, и беднейшими странами достигает нескольких десятков раз (Рисунок 1).

<sup>8</sup> Составлено по [Семченков и др. 2014].

<sup>9</sup> Global Energy and CO<sub>2</sub> Status Report 2018 // International Energy Agency. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document\\_cw\\_01.pdf](https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf) (дата обращения: 13.01.2021).



**Рисунок 1. Потребляемая ежегодная мощность жителями разных стран, 2019 г.<sup>10</sup>**

Специалисту, выступающему перед общественностью, точнее перед «авторитетными категориями населения», на мероприятиях любого формата можно рекомендовать демонстрировать этот рисунок с комментарием, что П.Л. Капица одним из первых обратил внимание на жесткую корреляцию между уровнем жизни населения и энергообеспеченностью на 1 жителя. Эта зависимость сохранила к настоящему времени свою актуальность. В многократно цитируемой работе [Martinez, Ebenhack 2008] представлена корреляция между индексом человеческого развития ООН и потреблением энергии на душу населения для 120 стран. Эти корреляции предполагают, что возможны успехи в развитии беднейших слоев населения мира при небольшом дополнительном доступе к энергии.

Периодически публикуются прогнозы развития энергетики, которые предсказывают те или иные колебания на уровне нескольких процентов, но не предвидят снижения производства энергии.

Необходимость развития экологически чистых источников энергии становится очевидной в мире [Brook et al. 2014]; в одной из последних работ [Turkson et al. 2020] отмечено, что устойчивое производство энергии становится все более важным из-за огромного давления на энергетические ресурсы для поддержки экономического развития и роста населения.

<sup>10</sup> Составлено по Справочное издание «Атлас мира, обзорно-географический». Издание 13-е, исправленное и дополненное. М.: ИЦП АСТ «Дизайн, Информация, Картография», 2019.

Если к моменту стабилизации численности населения планеты на уровне 12–13 млрд чел каждый житель будет ежегодно потреблять в среднем 4 кВт/чел, то годовое производство энергии вырастет в три–четыре раза — до уровня  $\sim(5\dots6)\cdot 10^4$  ГВт. Где взять эту энергию, есть ли она на планете, каким будет основным энергоноситель, надолго ли его хватит и можно ли на нем построить стабильную и долгосрочную энергетику?

Известен резкий скачок в производстве энергии, начавшийся в середине прошлого века, когда был реализован принцип максимизации добычи и потребления без соответствующей защиты окружающей среды [Прогноз развития энергетики мира и России 2016]. Человечество до сих пор живет в рамках парадигмы, возникшей тысячелетия назад: непрерывный рост потребностей и сохранение отношения к природе как к неограниченному резервуару, позволяющему эти потребности удовлетворять, снабжать сырьем и утилизировать отходы. Скорее всего, ее придется пересмотреть.

«Идеальная» энерготехнология будущего не должна зависеть от неопределенностей с обеспечением топливным сырьем по крайней мере на ближайшие сотни лет. Процесс получения энергии («сжигания» топлива) не должен сопровождаться выбросами вредных веществ, или их должно быть мало, или они должны быть надежно локализованы как при штатной работе, так и при аварийных ситуациях. Локализуемые отходы не должны быть физически и химически более активны, чем исходное топливное сырье. Ни одна из существующих энерготехнологий этим требованиям пока не удовлетворяет. Однако зародыш такой технологии есть — ядерная энергетика (Таблица 2). Ее следует демонстрировать слушателям с комментариями о достоинствах и недостатках разных типов энергетик, подчеркивая, что у атомной энергетике, безусловно, есть недостатки, но у остальных их намного больше.

**Таблица 2. Потребление топлива, кислорода и выброс углекислого газа (млн т/год) для электростанций разных типов по сравнению с атомной станцией, нормированное на 1 ГВт (эл)<sup>11</sup>**

Топливо	Потребление		Выброс
	топливо	кислород	CO <sub>2</sub>
Уголь	3,3	6,3	9,1
Мазут	2,4	4,5	6,7
Газ	1,9	3,3	4,8
Уран	20...50 т/г	0	0

<sup>11</sup> Составлено авторами. Величины ориентировочные, так как зависят от теплотворной способности топлива конкретных месторождений и КПД оборудования станций.

### ***Основной энергоноситель будущей энергетики***

В настоящее время энергоносители — это основной товар на международных рынках, с которым связаны наиболее острые международные проблемы, например из-за газопровода «Северный поток-2». Вполне возможно, что через несколько десятилетий использование угля, нефти и газа уменьшится из-за истощения запасов или будет законодательно ограничено из-за экологических угроз. Тогда единственным энергоносителем останется уран, но не для открытого топливного цикла на уране-235, а для замкнутого с использованием урана-238 в реакторах на быстрых нейтронах.

В научной печати обсуждаются оставшиеся на планете запасы угля, нефти, газа и урана. Запасы угля наибольшие, и их хватит на несколько столетий, запасы нефти и газа близки к исчерпанию, и их хватит на несколько десятилетий, об этом говорят давно, но кризис потребления так и не наступил. Запасов урана при использовании его в реакторах на тепловых нейтронах хватит на несколько десятилетий. Как бы то ни было, но ни один из этих энергоносителей не подходит для «идеальной» энерготехнологии будущего. Но других энергоносителей пока нет, или они человечеству еще неизвестны, поэтому единственным выходом представляется создание замкнутого ядерно-топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах, который по меньшей мере на два порядка увеличивает энергетический ресурс доступного естественного урана.

Как только атомная энергетика с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым топливным циклом станет глобальной энергетикой будущего, то сразу же наиболее востребованным товаром станет уран, так как он наиболее энергоемкий и в 1 кг урана содержится на 6 порядков больше энергии, чем в кг углеводородного топлива. Действительно, теплотворная способность древесины, угля, нефти и газа равна 10–15, 15–30, ~40 и ~50 МДж/кг соответственно, тогда как для ядерного топлива —  $\sim 8 \cdot 10^7$  МДж/кг. Специалисту, выступающему перед общественностью на мероприятиях любого формата, можно рекомендовать подготовить слайд/рисунок и подчеркнуть эффективность ядерного топлива.

### ***Потребности в уране***

Вклад атомной энергетики в энергетический баланс современной цивилизации с учетом неизбежного роста численности населения и энергопотребления необходимократно увеличивать, желательно до ~60–70%. Остальное обеспечат гидроэнергетика, биотопливо и возобновляемые источники энергии (солнечная, ветровая и пр.), хотя их вклад не может быть большим. Примерно до таких же масштабов необходимо увеличивать долю атомной энергетики в энергетическом балансе России.

Современная ядерная энергетика России — это 10 АЭС с 37 энергоблоками установленной мощностью 30,1 ГВт (эл) ~ (75...85) ГВт тепловой, и, следовательно, за год в ней сгорает ~ (35...40) т урана-235, которое содержится в ~6000 т естественного урана (содержание урана-235 в естественном уране ~0,7%). С учетом неполного извлечения урана-235 при обогащении и неизбежных потерь ежегодная потребность России составляет примерно 10000 т естественного урана для обеспечения реакторов на тепловых нейтронах. Запасы урана в России со стоимостью добычи до 130 \$/кг оценены на уровне 635 тыс. т., и его хватит на ~60–100 лет для энергетики на тепловых нейтронах при существующей доле атомной энергетики в энергетическом балансе. При увеличении доли атомной энергетики до ~70–80% и одновременном переходе на реакторы на быстрых нейтронах запасов урана хватит примерно на 600–1000 лет.

Часть необходимого запаса уже наработана ранее в виде обедненного гексафторида урана ядерной чистоты, и его следует рассматривать как «стратегический запас» и ценное сырье для будущей энергетики, но не как отходы<sup>12</sup>. По военным и гражданским программам за последние 70 лет ГК «Росатом» наработал около 1 млн т. ОГФУ и примерно за этот же срок его переработает в экологически безопасный уран и фтор. Это результат работы в течение полувека горнодобывающих предприятий, химических комбинатов и обогатительных производств. Словосочетание «ценное сырье» станет более наглядным и понятным, если ценность запасов ОГФУ выразить не в денежных единицах, которые могут изменяться в зависимости от тех или иных исторических событий, а в абсолютных единицах энергии, которые в принципе неизменны.

Легко вычислить, что в 1 млн т. естественного урана ядерной чистоты, готового к загрузке в реактор на быстрых нейтронах, содержится  $8 \cdot 10^{22}$  Дж энергии. Выше было отмечено, что человечество в настоящее время ежегодно производит  $\sim 6 \cdot 10^{20}$  Дж, и, следовательно, в накопленном уране ядерной чистоты заключена энергия, на два порядка превосходящая годовые потребности человечества. Гексафторид урана — это не радиоактивные отходы, это уже готовый источник урана и фтора ядерной чистоты, то есть ценное сырье для энергетики на быстрых нейтронах, и будущим поколениям будет передан уже готовый энергоноситель, который содержит энергию на сотню лет. Сегодня в нем нет большой надобности, так как уран-235 из него в основном извлечен, но

---

<sup>12</sup> Никитин А.К. Муратов О.Э., Вахрушева К.В. Обедненный гексофторид урана: современная ситуация, вопросы безопасного обращения и перспективы // Росатом [Электронный ресурс]. URL: [https://rosatom.ru/ogfu\\_report\\_2020.pdf](https://rosatom.ru/ogfu_report_2020.pdf) (дата обращения: 13.01.2021); Шульга И. Наследие обогащения // Атомный эксперт [Электронный ресурс]. URL: <https://atomicexpert.com/page2745599.html> (дата обращения: 13.01.2021).

потребность в уране-238 появится через несколько десятилетий при запуске атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом.

По мере роста населения Земли до 12–13 млрд чел. население России достигнет ~200 млн чел. Если среднее потребление энергии в стране к этому времени прогнозировать на уровне 10–20 кВт/чел, то потребуется  $\sim 10^{20}$  Дж, и такая энергия сосредоточена в  $\sim 1200$  т.У.

При переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в замкнутом цикле неизбежны потери урана, и потребление урана будет  $\sim 1500$ – $2000$  т/год, и накопленный запас 1 млн т. ОГФУ не только обеспечит страну энергией на несколько столетий, но и позволит реализовывать уран на международном рынке.

В настоящее время в ГК «Росатом» принята «Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года», предусматривающая на первом этапе создание двухкомпонентной ядерной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом с переходом на однокомпонентную с реакторами на быстрых нейтронах. При ее реализации незамедлительно будут востребованы запасы ОГФУ, которых России для собственных нужд хватит на несколько столетий с одновременной продажей на мировом рынке.

### ***Проблемы отходов***

Проблемы отходов, в том числе и радиоактивных, последнее время активно обсуждаются, но широкие массы населения вряд ли знают разницу между РАО и ОЯТ и, скорее всего, не знакомы с законодательно установленным определением термина «отходы». Специалисты атомной отрасли продолжают разяснять смысл этого термина, объясняют, что объемы радиоактивных отходов малы, они в сотни раз меньше бытовых и в тысячи раз — промышленных. Медианные значения образования для твердых радиоактивных отходов категорий ОНАО, НАО, САО и ВАО<sup>13</sup> равны  $1,5 \cdot 10^{-2}$ ,  $3,3 \cdot 10^{-2}$ ,  $3,3 \cdot 10^{-3}$  и  $2,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/ГВт·ч соответственно; для жидких радиоактивных отходов категорий НАО и САО —  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/ГВт·ч и  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/ГВт·ч соответственно [Екидин, Антонов 2020]. Малый объем РАО позволяет специалистами ГК «Росатом» обеспечивать достаточно высокий уровень их изоляции и безопасности.

---

<sup>13</sup> ОНАО — очень низкоактивные отходы; НАО — низкоактивные отходы; САО — среднеактивные отходы; ВАО — высокоактивные отходы.

В настоящее время у населения гораздо больше проблем с бытовыми отходами, например, в крупных мегаполисах они уже выходят на первый план в информационной повестке. Представленные на Рисунке 2 иконки трех типов отходов (промышленные, бытовые и радиоактивные) выполнены в масштабе по официальным данным, и такую наглядную аргументацию следует использовать в разъяснительной работе в любом формате взаимодействия с общественностью — зрелищная информация гораздо эффективнее.



**Рисунок 2. Соотношение образующихся масс промышленных, бытовых и радиоактивных отходов в России, 2018 г.<sup>14</sup>**

### ***Особенности топливных циклов***

Открытый топливный цикл с реакторами на тепловых нейтронах, реализованный в настоящее время, базируется на использовании энергетической ценности изотопа урана-235, доля которого в естественном уране 0,7%. Цикл предусматривает обогащение урана до ~3–5% по урану-235, изготовление из обогащенного урана топлива и проведение топливной кампании, в которой большая часть урана-235 выгорает и отдает свою энергию, переработку отработанных тепловыделяющих сборок (ОТВС) и длительное хранение образовавшегося ОЯТ. Таким образом, уран-238, доля которого в естественном уране 99,3%, не используется в открытом цикле для получения энергии.

<sup>14</sup> Составлено по Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». Глава 8 «Обращение с отходами производства и потребления // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://gosdoklad-ecology.ru/2018/obrashchenie-s-otkhodami-proizvodstva-i-potrebleniya/otkhody-proizvodstva-i-potrebleniya/section.pdf> (дата обращения: 26.01.2021). Примечание: ТБО — твердые бытовые отходы.

Кампания топлива в открытом цикле заканчивается к моменту, когда в нем накопится много осколков деления (шлаков), выгорит основная масса делящегося изотопа уран-235 и дальнейшая цепная реакция делений станет невозможной. Уран-238 не может поддерживать цепную реакцию, так как не делится тепловыми нейтронами. Поэтому отработавшее топливо открытого цикла при переработке очищают от шлаков и пополняют ураном-235 или плутонием, то есть изготавливают новое топливо. Такая технология в настоящее время отработана, но работоспособна до тех пор, пока имеются достаточные резервы урана-235 или плутония.

Замкнутый уран-плутониевый топливный цикл с реакторами на быстрых нейтронах будет основан на использовании урана-238 и нарабатываемого на нем плутония, то есть существующая сырьевая база будет заменена на существенно большую. Замкнутому циклу будет предшествовать переходной этап продолжительностью в 30–50 лет с двухкомпонентной атомной энергетикой, сочетающий существующие реакторы на тепловых нейтронах и открытым топливным циклом с вновь строящимися реакторами на быстрых нейтронах с замкнутым циклом. По мере выработки ресурса реакторы на тепловых нейтронах уступят место быстрым реакторам.

Кампания топлива в реакторе на быстрых нейтронах заканчивается, когда в топливе накопится много осколков деления (шлаков). Принципиальная разница в том, что уран-238 может поддерживать цепную реакцию делениями на быстрых нейтронах и, самое главное, в течение кампании на уране-238 нарабатываются новые ядра плутония взамен выгоревших. Технологический процесс замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) предусматривает, что ОЯТ после завершения топливной кампании в реакторе перерабатывается с добавлением урана-238 (но не урана-235), вновь загружается в реактор для новой топливной кампании, и рециклинг повторяется многократно, вплоть до полного выгорания исходной массы урана-238.

### ***Особенности аварийных ситуаций***

За последние полвека были около десятка аварий с контейнерами в хранилище с твердым ОГФУ ( $UF_6$ ). Большинство аварий было вызвано коррозией вокруг вмятин, образовавшихся при неправильном обращении, или из-за коррозии вокруг дефектов сварки. При разгерметизации контейнера главную опасность представляет утечка  $UF_6$  в окружающую среду, он реагирует с влагой воздуха с образованием токсичной фтористоводородной кислоты (HF) и уранил-фторида ( $UO_2F_2$ ). Во всех публикациях отмечается, что «...оценки распределения в атмосфере затруднены, но, вероятно, при любой утечке распределение будет весьма локализованным»<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Справочник по ядерной энерготехнологии / Перевод с английского под редакцией академика АН СССР В.А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 123.

Тридцать пять лет назад, 25.08.1984, грузовое судно «Монт-Луи», которое транспортировало гексафторид урана для обогащения в Советском Союзе, затонуло в Северном море после столкновения с автомобильным паромом [Огюстен 1985]. На борту было 350 т гексафторида урана в 30 контейнерах, который везли в СССР (г. Рига) для переработки и получения обогащенного топлива для АЭС. В течение месяца все контейнеры были извлечены с затонувшего судна, пострадавших и загрязнения окружающей среды не было.

Специалист, проводящий беседу с общественностью, должен быть готов к вопросу «А что будет, если...?» и отвечать, что все это уже было и последствия аварии не вышли за пределы производственной территории.

### ***Заключение***

Использование разумных, логично выстроенных аргументов во взаимодействии с населением и общественностью позволит установить необходимую степень доверия и сформировать востребованное отношение общества к развитию атомной отрасли. Наряду с постоянным взаимодействием и организацией регулярного диалога с общественными организациями, региональными властями и органами местного самоуправления ключевым фактором становится работа с молодежью и школьниками, в том числе с использованием социальных сетей, действующих по принципу слабой связи.

Среди предлагаемых аргументов в информационной работе следует использовать следующие основные тезисы: во-первых, внедрение в атомную энергетику реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом позволит существенно изменить атомную отрасль и решить ряд задач, значимость которых превышает региональные или национальные масштабы; во-вторых, увеличение доли атомной энергетики в мировом балансе кратно снижает выбросы в атмосферу углекислого газа и потребление кислорода, позволяет существенно снизить добычу углеводородных энергоносителей (угля, нефти и газа) с соответствующими промышленными отходами, снижает потребности в добыче природного урана и расширяет топливную базу энергетики на несколько столетий. Последующий переход на ториевый цикл втрое увеличит топливную базу и решит энерго-экологические проблемы современной цивилизации. Замкнутый цикл позволит задействовать накопленный за последние десятилетия запас урана-238, хранящийся сейчас в виде гексафторида урана.

Специалист, использующий приведенные аргументы в информационной работе с разными группами населения и общественностью в любых форматах, может успешно выполнить свою задачу, способствуя решению назревших энерго-экологических проблем и развитию атомной отрасли. Широкое информирование позволит воспитать более доверительное отношение населения к атомной энергетике и отрасли, которое может стать одной из движущих сил их развития.

**Список литературы:**

- Головихина О.С., Горин Н.В., Шмаков Д.В., Матвеева Л.Г. Опыт Госкорпорации «Росатом» по привлечению молодежи к информационной работе в интересах атомной энергетики // Вестник ЧГПУ. 2018. № 1. С. 67–77. DOI: 10.25588/CSPU.2018.01.07.
- Горин Н.В., Волошин Н.П., Шмаков Д.В., Чуриков Ю.И., Екидин А.А., Головихина О.С., Васильев А.П., Дерябин С.А. К вопросу формирования радиационной грамотности населения // Здоровоохранение, образование и безопасность. 2018а. № 4(16). С. 137–145.
- Горин Н.В., Головихина О.С., Абрамова Н.Л., Нечаева С.В., Матвеева Л.Г. Развитие инициативы Госкорпорации «Росатом»: образовательный проект «Зеленый квадрат // Педагогическое образование в России. 2018б. № 12. С. 23–28. DOI: [10.26170/po18-12-04](https://doi.org/10.26170/po18-12-04).
- Горин Н.В., Екидин А.А., Нечаева С.В., Головихина О.С. Информационные интересы общества и объектов атомной отрасли: уроки конфликтов // Государственное управление. Электронный вестник. 2020. № 83. С. 47–61. DOI: 10.24411/2070-1381-2020-10108.
- Екидин А.А., Антонов К.Л. Применение удельного показателя для оценки объемов образования РАО при нормальной эксплуатации АЭС России // Радиоактивные отходы. 2020. № 11. С. 66–74. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-66-74.
- Мельникова Н.В., Артемов Е.Т., Бедель А.Э., Волошин Н.П., Михеев М.В. История взаимодействия ядерной энергии и общества в России. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. DOI: 10.15826/B978-7996-2492-7.
- Огюстен Б. Авария судна Монт-Луи и ядерная безопасность // Бюллетень МАГАТЭ. 1985. Т. 27. № 1. С. 31–34.
- Панченко С.В., Линге И.И., Сахаров К.В., Воробьева Л.М., Мелихова Е.М., Уткин С.С., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Гераськин С.А. Радиологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. М.: «САМ полиграфист», 2015.
- Пономарев-Степной Н.Н. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 233–239. DOI: 10.1007/s10512-016-0123-x.
- Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / под ред. А.А. Макарова, Л.М. Григорьева, Т.А. Митровой. М.: ИНЭИ РАН-АЦ при Правительстве РФ, 2016.
- Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН — Московская школа управления СКОЛКОВО, 2019.

Семченков Ю.М., Сидоренко В.А., Алексеев П.Н., Чибиняев А.В., Бобров Е.А., Дудников А.А., Теплов П.С. Развитие проекта ВВЭР для работы в замкнутом топливном цикле // Третья международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» МНТК НИКИЭТ-2014, 7–10 октября 2014 г. М: НИКИЭТ, 2014. Т. 1. С. 71–82.

Brook B.W., Alonso A., Meneley D.A., Misak J., Bles T., van Erp J.B. Why Nuclear Energy Is Sustainable and Has to Be Part of the Energy Mix // *Sustainable Materials and Technologies*. 2014. No. 1–2. P. 8–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.001>.

Martinez D.M., Ebenhack B.W. Understanding the Role of Energy Consumption in Human Development through the Use of Saturation Phenomena // *Energy Policy*. 2008. Vol. 36. Is. 4. P. 1430–1435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.12.016>.

Turkson C., Acquaye A., Liu W., Papadopoulos T. Sustainability Assessment of Energy Production: A Critical Review of Methods, Measures and Issues // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 264. Is. 15. DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.110464](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110464).

Дата поступления: 27.01.2021

#### **References:**

Augustin B. (1985) The Sinking of the Mont-Louis and Nuclear Safety. *Byulleten' MAGATE*. Vol. 27. No. 1. P. 40–47.

Brook B.W., Alonso A., Meneley D.A., Misak J., Bles T., van Erp J.B. (2014) Why Nuclear Energy Is Sustainable and Has to Be Part of the Energy Mix. *Sustainable Materials and Technologies*. No. 1–2. P. 8–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.001>.

Ekin A.A., Antonov K.L. (2020) Estimation of Radioactive Wastes Generation Volumes During Normal Operation of Nuclear Power Plants in Russia. *Radioaktivnye othody*. No. 11. P. 66–74. DOI: [10.25283/2587-9707-2020-2-66-74](https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-2-66-74).

Golovikhina O.S., Gorin N.V., Shmakov D.V., Matveeva L.G. (2018) Experience of ROSATOM on Involvement of Youth in Information Work to the Benefit of Nuclear-Power Engineering. *Vestnik ChGPU*. No. 1. P. 67–77. DOI: [10.25588/CSPU.2018.01.07](https://doi.org/10.25588/CSPU.2018.01.07).

Gorin N.V., Ekin A.A., Nechaeva S.V., Golovikhina O.S. (2020) Society and Atomic Industry Enterprises Information Interests: Experience of Conflicts. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyy vipusk*. No. 83. P. 47–61. DOI: [10.24411/2070-1381-2020-10108](https://doi.org/10.24411/2070-1381-2020-10108).

Gorin N.V., Golovikhina O.S., Abramova N.L., Nechaeva S.V., Matveeva L.G. (2018b) Developing the ROSATOM Initiative: “Green Square” Educational Project. *Pedagogicheskoe obrazovanie v Rossii*. No. 12. P. 23–29. DOI: [10.26170/po18-12-04](https://doi.org/10.26170/po18-12-04).

- Gorin N.V., Voloshin N.P., Shmakov D.V., Churikov Yu.I., Ekidin A.A., Golovikhina O.S., Vasil'yev A.P., Deryabin S.A. (2018a) To the Question of Radiation Literacy Formation of the Population. *Zdravoohranenie, obrazovanie i bezopasnost'*. No. 4(16). P. 137–146.
- Makarov A.A., Grigor'ev L.M., Mitrova T.A. (eds.) (2016) *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2016* [Global and Russian energy outlook 2016]. Moscow: IN·EI RAN–ATs pri Pravitel'stve RF.
- Makarov A.A., Mitrova T.A., Kulagin V.A. (eds.) (2019) *Global and Russian Energy Outlook 2019*. Moscow: IN·EI RAN — Moskovskaya shkola upravleniya SKOLKOVO.
- Martinez D.M., Ebenhack B.W. (2008) Understanding the Role of Energy Consumption in Human Development through the Use of Saturation Phenomena. *Energy Policy*. Vol. 36. Is. 4. P. 1430–1435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.12.016>
- Melnikova N.V., Artemov E.T., Bedel A.E., Voloshin N.P., Mikheev M.V. (2018) *The History of Interaction between Nuclear Energy and Society in Russia*. Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta. DOI: 10.15826/B978-7996-2492-7.
- Panchenko S.V., Linge I.I., Saharov K.V., Vorob'eva L.M., Melihova E.M., Utkin S.S., Kryshev I.I., Sazykina T.G., Geras'kin S.A. (2015) *Radiologicheskaya obstanovka v regionah raspolozheniya predpriyatij Rosatoma*. [Radiologic environment in the regions with ROSATOM enterprises]. Moscow: «SAM poligrafist».
- Ponomarev-Stepnoi N.N. (2016) Two-Component Nuclear Power System with a Closed Nuclear Fuel Cycle Based on BN and VVER Reactors. *Atomnaya energiya*. Vol. 120. No. 4. P. 233–239. DOI: 10.1007/s10512-016-0123-x.
- Semchenkov Yu.M., Sidorenko V.A., Alekseev P.N., Chibinyayev A.V., Bobrov E.A., Dudnikov A.A., Teplov P.S. (2014) Razvitiye proyekta VV·ER dlya raboty v zamknutom toplivnom tsikle [Development of a VVER project for operation in a closed fuel cycle]. *Tret'ya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Innovatsionnyye projekty i tekhnologii yadernoy energetiki» MNTK NIKIET-2014, 7–10 October*. Moscow: NIKIET. Vol. 1. P. 71–82.
- Turkson C., Acquaye A., Liu W., Papadopoulos T. (2020) Sustainability Assessment of Energy Production: A Critical Review of Methods, Measures and Issues. *Journal of Environmental Management*. Vol. 264. Is. 15. DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.110464](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110464).

Received: 27.01.2021