

УДК: 54:620.91

DOI:

Н.П. Тарасова¹, Н.А. Куликова² и И.В. Перминова²¹Институт химии и проблем устойчивого развития Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Москва²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

E-mail: ipermirova@gmail.com

«ЗЕЛЕНАЯ ХИМИЯ» ДЛЯ «ЗЕЛеноЙ ЭНЕРГЕТИКИ»

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена демонстрации возможности применения принципов «зеленой химии» при реализации решений «зеленой энергетики». Приведены данные, демонстрирующие высокую потребность «зеленой энергетики» в минеральных ресурсах, превышающих потребность традиционной энергетики. Описаны проблемы, обусловленные ростом отходов при генерации «чистой энергии». Перечислены рекомендации, призванные обеспечить безопасность ресурсной базы для развития «зеленой энергетики».

Ключевые слова: ресурсная база энергетики, редкоземельные элементы, мировая добыча полезных ископаемых, атомная эффективность.

ABSTRACT

This paper demonstrates the feasibility of applying the principles of "green chemistry" in the implementation of "green energy" solutions. Data are presented showing that "green energy" has a significantly higher demand for mineral resources compared to traditional energy systems. The environmental and resource-related problems arising from the growing volumes of waste generated by "clean energy" technologies are described. A set of recommendations is proposed to ensure the long-term safety and sustainability of the resource base for "green energy" development.

Keywords: energy resource base, rare earth elements, global mining, nuclear efficiency.

ВВЕДЕНИЕ

«Ноосфера есть новое геологическое явление на нашей планете. В ней впервые человек становится крупнейшей геологической силой. Он может и

должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни, перестраивать коренным образом по сравнению с тем, что было раньше. Перед ним открываются всё более и более широкие творческие возможности. И, может быть, поколение моей внучки уже приблизится к их расцвету», – писал великий российский философ и естествоиспытатель В.И. Вернадский в знаменитой работе «Несколько слов о ноосфере» (Вернадский, 1944). «Поколение внучки» – это нынешнее время, и сейчас надо попытаться ответить на следующие вопросы:

В какой степени мы приблизились к расцвету творческих возможностей человека?

Как «коренным образом» перестраивается биосфера под влиянием человека?

Масштабы человеческой деятельности возросли с середины 20-го века настолько резко, что относительно стабильная окружающая среда эпохи голоцена, единственного периода существования планеты, для которого известно, что он может поддерживать функционирование современного человеческого общества, в настоящее время претерпевает существенные изменения. Точкой отсчета новой геологической эпохи, которая получила название антропоцен, принято считать годы начала «Великого Ускорения» – 1950–1952 гг. (Crutzen, 2002; Steffen et al., 2015). На этой стадии анализа и обсуждения прогноза В.И. Вернадского можно сказать: «Да, прогноз сбылся». Действительно, человек сегодня в состоянии менять окружающую среду в такой же степени, как и геологические силы природы. Наступивший антропоцен принес с собой ряд дотоле невиданных глобальных проблем: конечность ряда природных ресурсов, глобальное изменение климата, деградация систем поддержания жизни на Земле и других.

Реакцией научного сообщества явилось создание компьютерных моделей возможных траекторий развития будущего человеческой цивилизации. В частности, результаты построения прогнозов с помощью модели World3 (её авторы Донелла Медоуз, Деннис Медоуз, Йорген Рандерс и Уильям Беренс III) показали, что при существующем уровне потребления и ограниченных ресурсах в середине 20-х годов 21-го века (точка нашего сегодня) может наблюдаться серия кризисных явлений, угрожающих существованию цивилизации. Результаты моделирования были опубликованы в монографии «The Limits to Growth» в 1972 году (Meadows et al., 1972). Книга произвела настоящий взрыв в обществе и явилась прологом появления концепции устойчивого развития как альтернативы

«антропоцену». Разработка идей устойчивого развития привела к появлению и становлению принципов «зеленой химии» – новой философии в химии, теоретической и прикладной (Anastas, Warner, 1998), направленной на минимизацию отходов и токсичности производств.

Цель настоящей статьи – перекинуть мостик от идей «зеленой химии» к «зеленой энергетике», при реализации которой должны неукоснительно соблюдаться принципы «зеленой химии», в противном случае переход на «зеленую энергетику» может только ускорить спрогнозированный коллапс экономики. Это связано с колоссальными потребностями «зеленой энергетике» в минеральных ресурсах – во много раз превышающими энергетику ископаемого топлива. При этом большинство из этих минералов придется добывать из руды в связи с недостаточно хорошо отработанными технологиями переработки отходов и масштабностью запросов.

1. «ЗЕЛЕНАЯ ХИМИЯ» КАК СОВРЕМЕННАЯ ФИЛОСОФИЯ ДИЗАЙНА ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ

Химическая индустрия производит продукты на 7,5 триллионов долларов, что составляет около 7% от глобального валового продукта. Принимая во внимание, что в 2024 году 66% глобального валового продукта обеспечивали услуги: индустрия – 26% и сельское хозяйство – 4%, то вклад химической индустрии составляет более четверти глобального индустриального валового продукта. Это ключевой сектор промышленности, который вовлечен в производство 96% всех выпускаемых товаров. Поэтому не случайно, что именно химическая промышленность стала пионером в новой идеологии производства продуктов, основным девизом которой стала минимизация отходов «в зародыше» и снижение негативного воздействия индустриального производства на окружающую среду. Тем самым инженеры–химики первыми системно отреагировали на угрозы выживания, которые создала для человечества эпоха «великого ускорения» – неограниченного экспоненциального роста производства в условиях ограниченных ресурсов на планете.

Принципы «зеленой химии» были сформулированы и опубликованы Полом Анастасом и Дж. Уорнером в её «манифесте» – книге под названием «Green Chemistry: Theory and Practice» (1998). Двенадцать принципов «зеленой химии» гласят:

1. Предотвращение отходов: Лучше предотвратить появление отходов, чем перерабатывать или утилизировать их.
 2. Экономия атомов: Синтез следует планировать так, чтобы максимальное количество исходных веществ входило в конечный продукт.
 3. Менее опасные химические синтезы: Использование и получение веществ, малотоксичных или нетоксичных для человека и природы.
 4. Разработка безопасных химических продуктов: Продукты должны сохранять функциональность, но иметь минимальную токсичность.
 5. Безопасные растворители и вспомогательные вещества: Исключить или минимизировать использование растворителей, экстрагентов и других вспомогательных веществ.
 6. Энергоэффективность: Проводить процессы при комнатной температуре и нормальном давлении, учитывая энергозатраты.
 7. Возобновляемое сырье: Использовать сельскохозяйственные продукты и отходы, а не исчерпаемые ресурсы.
 8. Сокращение промежуточных продуктов: Избегать создания производных веществ (защитные группы, промежуточная модификация).
 9. Каталитические процессы: Катализаторы (селективные) предпочтительнее стехиометрических реагентов.
 10. Биоразлагаемость: Продукты должны разлагаться после использования на безвредные компоненты.
 11. Аналитический контроль: Мониторинг производства в реальном времени для предотвращения образования опасных отходов.
 12. Безопасные процессы: Выбирать вещества, сводящие к минимуму риск взрывов, пожаров и выбросов.
- Эти принципы показаны на рисунке 1 в виде циферблата «зеленой химии».



Рис. 1. Двенадцать принципов «зеленой химии».

Знакомство с этими принципами необходимо для демонстрации актуальности их неукоснительного применения при переходе на возобновляемые источники энергии и, в особенности, на электрообили. Ниже мы раскроем причины столь сильного утверждения. Для этого рассмотрим обстоятельства, которые будут сопутствовать глобальному переходу на «зеленую энергетику».

2. «ЗЕЛЕНАЯ ЭНЕРГЕТИКА»: ТИПЫ И ОСНОВНЫЕ ТRENДЫ

Весьма распространено мнение, что «зелёная энергетика», как и все «зеленое», несёт в себе только благую весть для окружающей среды – снижение углеродного следа, уменьшение эмиссии углекислого газа, что необходимо для замедления потепления нашей планеты. Однако далеко не так широко известно сопутствующее воздействие энергоперехода на мировую экономику, связанное с кардинальным изменением и глобальным перераспределением ресурсной базы такой энергетики.

«Зеленая энергетика» – это сектор энергетики, использующий возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечный свет, водные потоки, ветер, приливы, геотермальную теплоту, биотопливо. Такая энергетика называется возобновляемой, или регенеративной. На рисунке 2 представлено пять наиболее быстро растущих секторов возобновляемой энергетики.

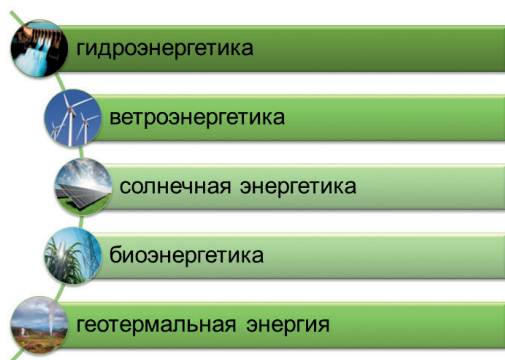


Рис. 2. Пять самых быстрорастущих областей «зеленой энергетики» (Top 5 Fastest-Growing..., 2021).

Солнечная энергетика является абсолютным лидером в расширении производства возобновляемой электроэнергии: на ее долю приходится почти 80% новых установок, при этом распределенная солнечная энергетика обеспечивает около 42% роста за счет домохозяйств, коммерческих зданий и промышленных крыш.

Расширяются также ветро- и гидроэнергетика. Ожидается, что морская ветроэнергетика добавит около 140 ГВт, а гидроэлектростанции удвоят свои мощности до 16,5 ГВт. В целом, ожидается, что возобновляемые источники энергии удовлетворят более 90% роста спроса на электроэнергию и превзойдут уголь, став крупнейшим в мире источником электроэнергии в 2025–2026 годах.

Лидерский отрыв в сфере солнечной энергетики обеспечил переход Китая (КНР) к конкурентным аукционам по возобновляемым источникам энергии. Это привело к снижению стоимости электроэнергии и укреплению доверия инвесторов, что повлекло за собой рекордный объем ввода в эксплуатацию солнечных и ветровых электростанций. В начале 2025 г. Китай ввел в эксплуатацию 240 ГВт новых солнечных мощностей, что является самым большим объемом, введенным в эксплуатацию какой-либо страной за один год.

Взрывное развитие ветроэнергетики достигнуто за счет технологических достижений в области новых композитных материалов, что способствовало увеличению сроков службы и снижению стоимости ветряных турбин. В результате, например, береговая ветроэнергетика обеспечивает выработку около 10% всей энергии в Великобритании и является для нее наиболее экономичным вариантом альтернативной энергетики. Морские ветряные электростанции снабжают электроэнергией около 4,5 миллионов домохозяйств в этой стране.

Биоэнергетика – четвертый по величине вид «зеленой» энергетики. Производство электроэнергии и тепла основывается на инновационном использовании традиционных источников биомассы, таких как побочные продукты сельского хозяйства и бытовые отходы. Китай, Великобритания и Индия в настоящее время являются лидерами в производстве биоэнергии. Бразилия, Германия, США и Швеция тоже активно развивают эти технологии.

Геотермальная энергия также входит в список ВИЭ, использование которых растет быстрыми темпами. Крупнейшим производителем геотермальной электроэнергии в мире является Исландия. Заметные позиции в данной сфере занимают Индонезия, Италия, Мексика, Филиппины и США.

При этом особо следует отметить, что энергетическая система, основанная на чистых энергетических технологиях, сильно отличается от системы, работающей на традиционных углеводородных

ресурсах. Электрические установки на солнечных фотоэлементах (PV), ветряные электростанции и электромобили (EV) обычно требуют для строительства больше полезных ископаемых, чем их аналоги на основе ископаемого топлива. Этой теме посвящен следующий раздел.

3. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РЕСУРСНОЙ БАЗЕ

С 2010 года среднее количество полезных ископаемых, необходимых для новой единицы мощности по производству электроэнергии, увеличилось на 50%, поскольку доля возобновляемых источников энергии в новых инвестициях возросла. На рисунке 3а показаны потребности в металлах «зеленой энергетики» по сравнению с электростанциями на природном газе и угле, а рисунок 3б показывает потребности электромобиля по сравнению с автомобилем с двигателем внутреннего сгорания (ДВС).

Как следует из приведенных данных, береговая ветроэлектростанция потребляет в девять раз больше ресурсов, чем электростанция на природном газе, а типичный электромобиль требует в шесть раз больше минеральных ресурсов, чем обычный автомобиль. Особенно велики требования при производстве электромобиля к потреблению никеля и лития, а морская ветровая энергетика существенно зависит от редкоземельных элементов (РЗЭ).

Помимо морской энергетики, потребление растет и для электромобилей. Так в 2024 г. спрос на РЗЭ для электродвигателей достиг 37 тыс. тонн, что на 32% больше, чем годом ранее. Основная часть спроса обусловлена тремя элементами: неодимом, диспрозием и тербием. По мере роста продаж электромобилей во всем мире, не только батареи, но и двигатели становятся одним из наиболее быстрорастущих источников спроса на редкоземельные магниты.

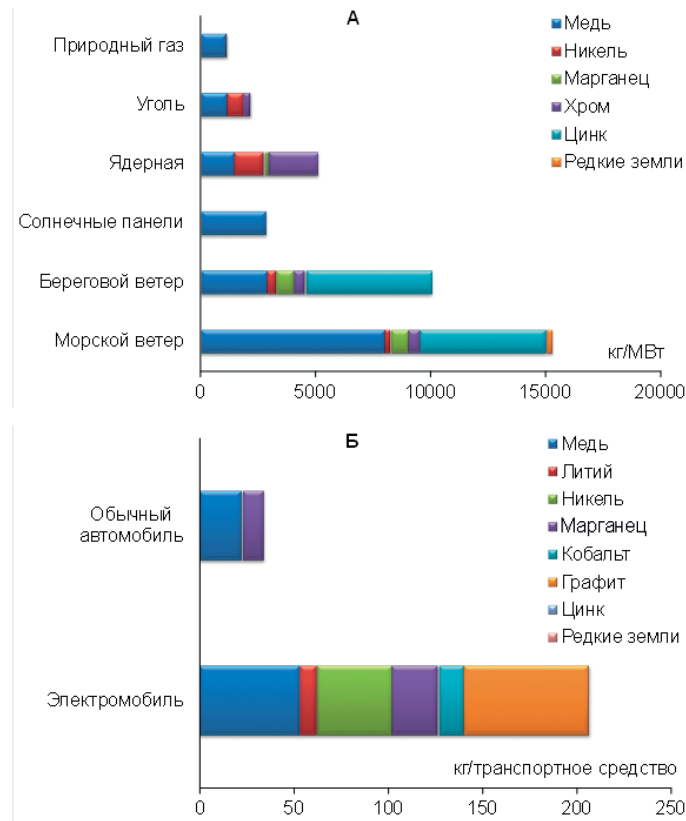


Рис. 3. Использование металлов в технологиях «зеленой энергетики» по сравнению с другими источниками электроэнергии (а) и в автомобилях с ДВС по сравнению с электромобилями (б).

Главные потребители РЗЭ – это синхронные двигатели с постоянными магнитами, которые обладают высокой эффективностью и компактностью конструкции. Асинхронные двигатели менее эффективны и более громоздки. Именно синхронные двигатели широко используются в автопроме Китая, что также способствовало их нынешнему статусу золотого отраслевого стандарта. При этом здесь стоит оговориться, что на Китай приходится более 90% мирового производства рафинированных РЗЭ и постоянных магнитов для электродвигателей, что не может не вызывать беспокойство у других стран. Легко заметить крайнюю неравномерность распределения ресурсной базы “зеленой энергетики” и по другим элементам (рис. 4).



Рис. 4. Доля тройки ведущих стран-производителей в мировой добыче отдельных полезных ископаемых, 2019 г.

Особо следует отметить, что указанные страны не только входят в тройку лидеров, но и в случае лития, кобальта и РЗЭ обеспечивают свыше 75% их добычи. Так, единичные страны-лидеры, например, Демократическая Республика Конго (ДРК) и Китай в 2019 г. выводили на рынок 60–70% от всей добываемой руды кобальта и РЗЭ соответственно. При этом Россия входит в топ-3 стран только по добыче никеля. Ее жесточайшим конкурентом является Индонезия, в активы которой вкладываются ведущие китайские компании. Столь высокая концентрация ресурсов “в одних руках” кардинальным образом отличается от нефтегазового рынка и несет с собой весьма существенные риски по поставкам сырья в случае геополитической напряженности в отдельной стране. При этом еще большая консолидация ресурсов наблюдается для обрабатывающих производств. Здесь единоличным мировым лидером становится Китай: по выплавке металлов на долю КНР приходится около 35% никеля, 50–70% лития и кобальта и около 90% РЗЭ в мире. Следовательно, переход на возобновляемые источники энергии кардинальным образом меняет список стран-выгодополучателей и аутсайдеров с наибольшими и наименьшими запасами

стратегического сырья для нужд энергетического сектора. И это не единственное далеко идущее следствие энергоперехода. Результатом резкого роста потребностей, как мы уже знаем, станет еще более резкий рост отходов производства. Этому аспекту посвящен следующий раздел.

4. «ЗЕЛЕНАЯ ЭНЕРГЕТИКА» И АТОМНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Многokратно возросшая потребность в минеральных ресурсах энергетического сектора неминуемо приведет к росту отходов при генерации «чистой энергии». Это связано не только с требуемыми новыми объемами сырья, но и с постоянно ухудшающимся качеством руды: богатые руды уже исчерпаны или подходят к границе исчерпания. Главный мировой тренд – горнодобывающая промышленность переходит на добычу все более бедных руд. Последствия этого тренда хорошо иллюстрирует основной количественный показатель «зеленой химии» – атомная эффективность (АЭ) производства. Ниже приведена формула для расчета атомной эффективности:

АТОМНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

=

Количество атомов в продукте

Количество атомов в исходных веществах

? 100%

На рисунке 5 показано, как атомная эффективность связана с отходами: высокая АЭ означает включение всех атомов прекурсоров в конечный химический продукт, низкая АЭ означает генерацию побочных продуктов за счет присутствия атомов в составе прекурсора, которые не входят в конечные продукты реакции. Эти побочные продукты образуют отходы, количество которых тем выше, чем ниже АЭ производственного процесса.

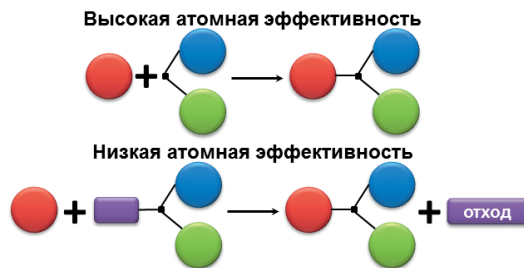


Рис. 5. Расчет атомной эффективности реакции и примеры реакций с высокой и низкой атомной эффективностью.

Рисунок 6 дает пример расчета АЭ для процесса извлечения меди и никеля из сульфидных руд, типичных для Норильского промышленного региона, где сосредоточены основные мощности нашей страны по добыче и выпуску никеля и меди.



Рис. 6. Пример расчета атомной эффективности (АЭ) для процесса обогащения и выплавки меди и никеля из сульфидных руд Норильского промышленного региона.

Из рисунка 6 следует, что если главные рудные минералы Норильского региона – пентландит, пирротин, халькопирит – представить в виде следующих химических формул: $NiFeS_2$, Fe_7S_8 , $CuFeS_2$, то из 23-х атомов железа, серы, меди и никеля извлекаются только два – медь и никель, а вся сера и железо идут в отходы. Тем самым из 100% атомов, входящих в состав чистой исходной руды, в результате процессов обогащения и выплавки 91% атомов направляется в отходы. И это без учета процесса добычи руды, львиную долю в котором составляют атомы, входящие в состав вскрышной породы. При добыче платиновых и РЗЭ величина АЭ еще на порядок ниже.

В то же время экономия атомов является фундаментальным принципом “зеленой химии”, и единственным условием превращения процессов извлечения ценных элементов из руд является повышение их АЭ: все атомы прекурсоров (сырья) должны перейти в продукты. На этом основан дизайн безотходных химических процессов, но аналогичные принципы должны быть положены и в основу переработки рудного сырья. Необходимы новые способы извлечения ценных компонентов из отходов, что поможет присвоить отходам статус вторичного минерального сырья. Еще одним неотъемлемым элементом процессов переработки сырья

должно стать замыкание технологических процессов в цикл, что позволит совсем уйти от отходов. Тем самым в основу решения проблем перехода к «зеленой энергетике» должны быть положены принципы “зеленой химии”.

5. ПУТИ РЕШЕНИЯ ВЫЗОВОВ «ЗЕЛеной ЭНЕРГЕТИКИ»

Для решения вызовов «зеленой энергетике» Международное энергетическое агентство (МЭА) сформулировало шесть рекомендаций, призванных обеспечить безопасность ресурсной базы для «зеленой энергетике». Рекомендации МЭА показаны на рисунке 7 и подробно раскрыты ниже:

- Нарастивать инвестиции в диверсификацию источников новых поставок полезных ископаемых для чистой энергетики.
- Продвигать технологические инновации на всех этапах цепочки создания стоимости. Активизировать исследования и разработки как со стороны потребителей, так и поставщиков для более эффективного использования материалов, поддерживать разработки по замене материалов, что может принести существенные выгоды для окружающей среды и безопасности.

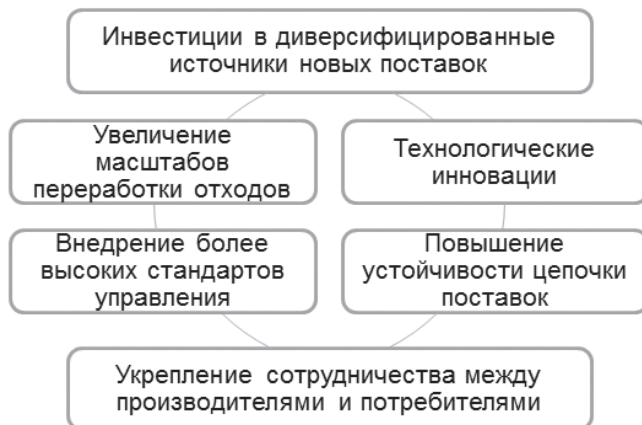


Рис. 7. Шесть ключевых рекомендаций МЭА по новому комплексному подходу к обеспечению безопасности ресурсов полезных ископаемых для «зеленой» энергетики.

- Увеличивать масштабы переработки отходов, поддерживая деятельность по сбору и сортировке отходов и финансируя исследования и разработки в области новых технологий переработки отходов.
- Повышать устойчивость цепочек поставок и прозрачность рынка различных полезных ископаемых путем регулярных оценок рынка и стресс-тестов и создания стратегических запасов по некоторым ископаемым.
- Внедрять более высокие экологические, социальные и управленческие стандарты для вознаграждения игроков с более высокими экологическими и социальными показателями, что может привести к большей диверсификации поставок.
- Укреплять международное сотрудничество между производителями и потребителями на основе диалога и координации политики для создания системы энергетической безопасности. Это касается предоставления надежных и прозрачных данных, проведения регулярных оценок уязвимостей во всех цепочках поставок, содействия передаче знаний по практике устойчивого развития и укрепления экологических и социальных стандартов для обеспечения равных условий разным странам.

Указанные рекомендации являются ответом на новые вызовы «зеленой энергетики». При этом нельзя не отметить, что принципы «зеленой химии» не только существенно перекликаются с рекомендациями 2, 3 и 5, но превосходят их по системности подхода и могут быть использованы для их внедрения на практике путем создания «зеленых» энергетических производств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Академик Николай Павлович Лаверов, выдающийся геолог и организатор науки, человек энциклопедических знаний, говорил, обращаясь к студентам Менделеевского университета, где он более пятнадцати лет блестяще читал курс «Рациональное использование природных ресурсов» в контексте глобальных проблем человечества: «Господствующие теории, которые лежат в основе наших представлений о развитии природных процессов, несовершенны. Поэтому желаю вам свой ум держать от них свободным».

Это то самое мышление «за горизонт», которое необходимо для реализации идей В.И. Вернадского, писавшего: «Тот народ, который сумеет возможно полно, возможно быстро, возможно совершенно овладеть новым открывающимся в человеческой жизни знанием, совершенно развить и приложить его к своей жизни – получит ту мощь, достижение которой и направление которой на общее благо является основной задачей всякой разумной государственной политики» (Вернадский, 1927).

Хочется надеяться, что предложенное в этой статье комплексное рассмотрение как достоинств, так и больших рисков перехода к возобновляемым источникам энергии в контексте принципов «зеленой химии» позволит многим снять «розовые очки» в отношении «зеленой энергетики». Тем самым будут созданы предпосылки для формирования более взвешенного восприятия этого процесса обществом, лишенным иллюзий, но исполненным ответственности за судьбы нашей планеты.

ЛИТЕРАТУРА

Вернадский В.И. Задачи минералогии в нашей стране. 1917-1927 // Природа. 1928. № 1. С. 21-40.

Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере // Успехи современной биологии. 1944. №. 18. Вып. 2. С. 113-120.

Anastas P.T., Warner J.C. *Green chemistry: theory and practice*. Oxford [England]; New York: Oxford University Press. 1998. 135 p.

Crutzen P.J. *Geology of mankind – The Anthropocene* // Nature. 2002. Vol. 415. P. 23.

Davies J. *Before the Great Acceleration: The Anthropocene, the modern world-system, and the formalisation debate* // The Anthropocene Review. 2025. Vol. 12. Issue 3. P. 465-493.

Hayes B. *Computation and the human predicament* // American Scientist. 2012. Vol. 100 (3). P. 186-191.

Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W. *The Limits to Growth. A Report to The Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books, 1972. 211 p.

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., Ludwig, C. *The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration* // The Anthropocene Review. 2015. Vol.1. P. 1-18.

Электронные ресурсы:

IEA *Critical Minerals and Clean Energy Summit delivers six key actions for secure, sustainable and responsible supply chains*. 2026. URL: <https://www.oilandgasadvancement.com/news/iea-critical-minerals-and-clean-energy-summit-delivers-six-key-actions-for-secure-sustainable-and-responsible-supply-chains> (дата обращения: 26.03.2026).

Top 5 Fastest-Growing Renewable Energy Sources Around the World, 2021. URL: <https://earth.org/fastest-growing-renewable-energy-sources> (дата обращения 26.03.2026).