

ЯДЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БОРЬБЫ С ПЛАСТИКОМ В ИНДОНЕЗИИ

© 2026

О. Л. Петрова¹

Индонезия ежегодно производит миллионы тонн пластиковых отходов — по оценкам различных источников, в последние годы этот показатель составляет около 7,8 млн тонн в год. Большая часть этих отходов неправильно утилизируется (неправильно собирается или выбрасывается), а не обрабатывается должным образом. Пластик стал важной составляющей бытовых отходов, во многих регионах уступая по этому показателю только пищевым отходам и составляя примерно 20% от всех отходов, указанных в национальной статистике.

Радиационная обработка — с использованием электронных пучков или гамма-лучей — позволяет делать то, что часто недоступно традиционным методам переработки. При широком внедрении и интеграции с традиционными стратегиями переработки и сокращения отходов такие технологии могут внести существенный вклад в замедление или стабилизацию роста загрязнения пластиком, особенно в регионах, где традиционная переработка отстает.

Ключевые слова: Индонезия, экология, пластиковые отходы, ядерные технологии, мирный атом

Для цитирования: Петрова О. Л. Ядерная технология борьбы с пластиком в Индонезии. *Вестник Института востоковедения РАН*. 2026. № 1. С. 136–142. DOI: 10.31696/2618-7302-2026-1-136-142

NUCLEAR TECHNOLOGY TO COMBAT PLASTIC POLLUTION IN INDONESIA

Olga L. Petrova

Indonesia produces millions of tons of plastic waste annually — estimates from various sources have been around 7.8 million tons per year in recent years. Much of this waste is improperly disposed of (incorrectly collected or discarded) rather than properly processed. Plastic has become a significant component of household waste, second only to food waste in many regions, accounting for approximately 20% of all waste reported in national statistics.

Radiation processing — using electron beams or gamma rays — offers capabilities often inaccessible to traditional recycling methods. When widely implemented and integrated with traditional recycling and waste reduction strategies, such technologies could significantly contribute to slowing or stabilizing the growth of plastic pollution, especially in regions where traditional recycling is lagging.

Keywords: Indonesia, ecology, plastic waste, nuclear technology, peaceful atom

For citation: Petrova O. L. Nuclear Technology to Combat Plastic Pollution in Indonesia. *Vestnik Instituta vostokovedeniya RAN*. 2026. No. 1. Pp. 136–142. DOI: 10.31696/2618-7302-2026-1-136-142

¹ Петрова Ольга Леонидовна, младший научный сотрудник Отдела Юго-Восточной Азии, Австралии и Океании Института востоковедения РАН, Москва; L.Petrova_Olga@mail.ru

Petrova Olga Leonidovna, Junior Research Fellow, Centre for South-East Asia, Australia, and Oceania, Institute of Oriental Studies RAS, Moscow; L.Petrova_Olga@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7782-277X

Индонезия ежегодно производит миллионы тонн пластиковых отходов — по оценкам различных источников, в последние годы этот показатель составляет около 7,8 млн тонн в год. Большая часть этих отходов неправильно утилизируется (неправильно собирается или выбрасывается), а не обрабатывается должным образом². Пластик стал важной составляющей бытовых отходов, во многих регионах уступая по этому показателю только пищевым отходам и составляя примерно 20% от всех отходов, указанных в национальной статистике [Prisca Triferna, Raka Adji, 2025].

Индонезия является одним из крупнейших в мире источников загрязнения морской среды пластиком. Большая часть пластиковых отходов попадает с суши в реки, а затем в океан, особенно с густонаселенных островов, таких как Ява и Суматра. Реки действуют как конвейеры, перенося мусор из населенных пунктов в морскую среду. Последние национальные данные показывают, что сотни тысяч тонн пластиковых отходов продолжают попадать в индонезийские воды каждый год, несмотря на то, что предпринятые в последнее время усилия снизили темпы утечки по сравнению с предыдущими годами [Prisca Triferna, Raka Adji, 2024]. Значительная часть домохозяйств, особенно в сельской местности, не имеет регулярных услуг по сбору отходов, что приводит к их прямому сбросу, открытому сжиганию или захоронению на неформальных площадках. Опросы показывают, что большинство населенных пунктов не имеют доступа к объектам по управлению отходами, что приводит к небезопасным методам утилизации [Muhammad Kholid Basyaiban, 2022]. Загрязнение пластиком наносит вред водным экосистемам, приводит к болезням или гибели животных, в желудках которых он распадается на микропластик, который сохраняется в организме десятилетиями. Открытое сжигание пластика высвобождает токсичные загрязняющие вещества, которые могут загрязнять воздух, почву, воду и даже пищевые цепи, влияя на здоровье дыхательной системы, репродуктивную систему и многое другое. Есть данные о том, что микропластик и токсичные соединения накапливаются в местных продуктах питания, что вызывает серьезные опасения для здоровья, особенно в районах, расположенных вблизи мест сжигания отходов [Johnny Wood Writer, 2019].

Помимо внутреннего производства пластика Индонезия стала пунктом назначения для импортируемых пластиковых отходов из более богатых стран в результате глобальных изменений в структуре торговли переработкой. Отчеты показывают, что ежегодно импортируются сотни тысяч тонн пластиковых отходов, которые часто сжигаются или выбрасываются из-за отсутствия местных мощностей для их безопасной переработки [Primagung Dary Riliananda, Garry Lotulung, 2025]. Это вызвало социальные и экологические опасения по поводу трансграничных потоков отходов и справедливости, а активисты называют это «отходным колониализмом»³. После запрета Китая импорта пластиковых отходов в 2018 г. Индонезия в течение следующих семи лет пережила резкий рост объемов поступающих отходов. В 2022 г. она стала третьим по величине в мире импортером пластиковых отходов, получив более 194 000 тонн отходов. Последние данные Центрального статистического агентства Индонезии за 2024 г. показали, что Индонезия импортировала в общей сложности 262 900 тонн пластиковых отходов на сумму около 105 млн долл. США (примерно 1,7 трлн индонезийских рупий). Эта цифра на 4% больше, чем в 2023 г., когда Индонезия импортировала 252 300 тонн. Нидерланды возглавили список крупнейших поставщиков, отправив 107 500 тонн. За ними следуют Германия и Бельгия с 59 100 и 28 800 тоннами соответственно.

² Plastic Waste Discharges from Rivers and Coastlines in Indonesia // World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/country/indonesia/publication/plastic-waste-discharges-from-rivers-and-coastlines-in-indonesia> (дата обращения: 21.01.2026).

³ Toxic tofu? How plastic waste from the west fuels food factories in Indonesia // The Guardian. URL: <https://www.theguardian.com/global-development/2025/may/10/tofu-plastic-indonesia> (дата обращения: 21.01.2026).

Выявилась тревожная тенденция: развитые страны используют развивающиеся страны в качестве свалок, избегая таким образом более высоких затрат на переработку и утилизацию отходов на своей территории.

Хотя осведомленность о проблеме пластика растет, многим домохозяйствам и сообществам по-прежнему не хватает ресурсов, стимулов или доступа к устойчивым системам утилизации и переработки.

В долгосрочной стратегии Индонезии по снижению выбросов углерода и устойчивости к изменению климата (LTS-LCCR 2050) есть пункт про восстановление зеленых насаждений в городах, использование новых систем переработки отходов и создание промышленных комплексов с высоким уровнем нового CO_2 . Эти цели также изложены в Национальном долгосрочном плане развития на 2025–2045 годы (RPJPN), который служит стратегическим руководством для национального развития. В соответствии с национальными целями одним из стратегических столпов правительство определило «устойчивое развитие» — реализацию политики, способствующей экологической устойчивости и социальной справедливости. Индонезия разработала пять стратегий и планов действий для долгосрочного сокращения пластиковых отходов:

- 1) усиление национального движения по комплексному управлению отходами с участием всех заинтересованных сторон и при поддержке строгих правил и их реализации на национальном и региональном уровнях;
- 2) внедрение системы управления отходами как на суше, так и на море с высокой интенсивностью, использованием технологических достижений, а также инициатив и участия местных сообществ;
- 3) улучшение управления пластиковыми отходами, включая загрязнение морской среды пластиковыми отходами от рыболовства, транспорта, туристических объектов и мероприятий, а также от населенных пунктов, особенно в прибрежных районах;
- 4) укрепление институционального и финансового потенциала, надзора и правоприменения;
- 5) исследования и разработки для поощрения инноваций и совершенствования технологий.

Инициатива NUTEC Plastics (Ядерные технологии для контроля загрязнения пластиком) была запущена Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в 2020 г. в качестве стратегической глобальной программы по изучению решений в области ядерных технологий для борьбы с загрязнением пластиком. Индонезия была выбрана в качестве одной из пилотных стран в Азиатско-Тихоокеанском регионе наряду с Малайзией и Филиппинами, чтобы внести свой вклад в эту работу и получить от нее выгоду. К октябрю 2022 г. Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии (BRIN) начало проводить официальные исследования по применению методов ядерного излучения, таких как гамма- и электронное облучение, для переработки пластиковых отходов. Эти ранние исследования были сосредоточены на том, как излучение может улучшить переработку полимеров и создать продукты с добавленной стоимостью, такие как древесно-полимерные композиты (ДПК). Другими словами, с помощью радиационных технологий пластиковые отходы могут быть разложены и модифицированы для повторного использования в качестве новых, ценных материалов. NUTEC Plastics [Martha Herlinawati Simanjuntak, 2022].

МАГАТЭ находится в авангарде применения ядерной науки и технологий для решения глобальных проблем, включая загрязнение пластиком. По словам представителей МАГАТЭ, ядерные методы могут помочь в оценке и понимании масштабов проблемы, а также в переработке пластика с помощью радиационных методов, которые позволяют производить материалы, которые могут быть в дальнейшем использованы в концепции циклической экономики. МАГАТЭ готово

предложить уникальные ядерные решения проблемы загрязнения пластиком посредством разработки и продвижения радиационных технологий. Подход программы NUTEC Plastics состоит из двух частей: 1) предоставление научно обоснованных данных для характеристики и оценки загрязнения морской среды микропластиком и 2) демонстрация использования ионизирующего излучения в переработке пластика для преобразования пластиковых отходов в пригодные для повторного использования ресурсы. Программа NUTEC Plastics расширит возможности лабораторий по изучению воздействия загрязнения пластиком на прибрежные и морские экосистемы [Joanne Liou, 2021].

В рамках программы МАГАТЭ NUTEC Plastics Индонезия присоединилась ко многим странам, участвующим в структурированных проектах технологического сотрудничества. Демонстрационный проект имеет три этапа:

- этап 1 — усиление управления пластиковыми отходами в перерабатывающем секторе;
- этап 2 — строительство демонстрационных объектов;
- этап 3 — внедрение передовых технологий переработки пластика с использованием облучения⁴.

Индонезия твердо придерживается политики по сокращению пластиковых отходов, в том числе морских. Например, по данным Министерства лесного хозяйства и окружающей среды (на данный момент это два разных министерства), за трехлетний период количество морских пластиковых отходов сократилось с 615 000 тонн в 2018 г. до примерно 521 000 тонн в декабре 2020 г. Это означает, что общее количество морских пластиковых отходов в Индонезии сократилось на 15,3% за указанный период как в наземной, так и в морской деятельности.

В период с 2022 по 2024 г. МАГАТЭ и BRIN организовали региональные и национальные встречи заинтересованных сторон для экспертов и представителей отечественной промышленности. Эти встречи способствовали формированию партнерских отношений между BRIN и компаниями частного сектора для разработки прототипов и тестирования применения результатов в продукции⁵.

К началу 2024 г. МАГАТЭ запустило второй этап инициативы NUTEC, направленной на переход от фундаментальных исследований к созданию мелкомасштабных прототипов с использованием электронно-лучевых технологий для переработки пластика⁶. В феврале 2025 г. BRIN и МАГАТЭ в рамках инициативы NUTEC Plastics провели в Джакарте координационные совещания по среднесрочной перспективе проекта RAS1031 «Повторное использование и переработка полимерных отходов путем радиационной модификации для производства промышленных товаров — Фаза II», подчеркнув важность совместных исследовательских работ по радиационной модификации пластика и планирования демонстрационных внедрений. BRIN выступил в качестве национального координатора, привлекая исследовательские учреждения и отраслевых партнеров к этой технологии. На этом мероприятии присутствовали эксперты МАГАТЭ, ученые из ряда стран, таких как Бангладеш, Иран, Иордания, Малайзия, Мьянма, Пакистан, Филиппины, Шри-Ланка, Таиланд и Вьетнам, а также промышленные партнеры [Esti Utami, 2025].

Радиационная модификация позволяет разрушать или сшивать полимерные цепи в пластике, что дает возможность получать более качественные переработанные материалы без использования высоких температур или токсичных химикатов.

⁴ NUTEC Plastic, Teknologi Nuklir untuk Tekan Polusi Sampah Plastik // Atnews. id. URL: <https://www.atnews.id/portal/news/8586> (дата обращения: 21.01.2026).

⁵ IAEA Backs Plastic Recycling in Asia-Pacific // Mirage News. URL: <https://www.miragenews.com/iaea-backs-plastic-recycling-in-asia-pacific-1388620/> (дата обращения: 21.01.2026).

⁶ Electron beam for plastics recycling — IAEA NUTEC Plastics initiative // International Irradiation Association. URL: <https://iia-global.com/iia-news/electron-beam-for-plastics-recycling-iaea-nutec-plastics-initiative/> (дата обращения: 21.01.2026).

В рамках масштабирования МАГАТЭ передало Индонезии установку для обработки электронным пучком с энергией 2,5 МэВ (ЕВМ) для поддержки передовых исследований и пилотных процессов облучения. Планировалось разместить эту установку в пределах ядерного комплекса Научно-технологической зоны им. Б. Дж. Хабиби (KST) в Серпонге для укрепления инфраструктуры исследований пластмасс и смежных ядерных исследований и разработок [Safrezi Fitra, 2024].

Электронные пучки — это потоки высокоэнергетических электронов, используемые для облучения пластиковых отходов, что может изменить свойства полимеров и сделать их более пригодными для переработки или промышленного повторного использования.

К середине 2024 г. формальные партнерства с участниками отрасли способствовали работе над продуктами с добавленной стоимостью (такими как искусственная солома и ДПК), изготовленными из облученных пластиковых отходов. Это сотрудничество рассматривается как критически важный шаг на пути к масштабированию процессов для коммерческого применения [Arie Widowati, 2025].

К началу 2025 г. BRIN сообщила о переходе проекта во вторую фазу в соответствии с графиком RAS1031 и достижении уровня готовности технологии (TRL) ~5, что свидетельствует о прогрессе в направлении пилотной валидации. Заявленная цель — дальнейшее развитие технологии (до TRL 7) и подготовка к коммерциализации примерно к 2027 г. Проект RAS1031 / INS 1031 — конкретный проект технического сотрудничества МАГАТЭ, в рамках которого BRIN проводит исследования и инновации в области радиационной обработки пластика [Sean Filo Muhamad, 2025].

Уровни технологической готовности или TRL (Technology Readiness Level) — это шкала оценки зрелости технологии на этапах ее концептуализации, разработки и применения. Включает 9 уровней, где один балл — самый низкий уровень, девять — самый высокий. TRL 5 означает, что экспериментальный образец изготовлен и испытан в реальном масштабе по полупромышленной технологии, воспроизведены основные внешние условия. Компоненты и/или макеты подсистем испытаны в условиях, близких к реальным. TRL 7 говорит о том, что прототип системы может быть показан в составе других систем в реальных эксплуатационных условиях.

Инициатива по развитию ядерных технологий для переработки пластика, такая как участие Индонезии в программе МАГАТЭ NUTEC Plastics, имеет важное значение во многих экологических, экономических и технологических аспектах — она соответствует долгосрочным прогнозам глобального загрязнения пластиком и устойчивого развития. Без решительных мер к 2050 г. производство пластика может увеличиться почти втрое, примерно до 1,1 млрд тонн в год, что значительно усилит давление на окружающую среду и ее загрязнение. Кроме того, согласно исследованию, опубликованному в журнале Science Advances, к 2050 г. в океане может быть больше пластика, чем рыбы — это яркий показатель того, насколько актуальной стала проблема пластикового загрязнения [Joanne Liou, 2021]. Радиационная обработка — с использованием электронных пучков или гамма-лучей — позволяет делать то, что часто недоступно традиционным методам переработки, а именно:

- модифицировать пластмассы на молекулярном уровне, чтобы материалы, которые трудно перерабатывать механически, можно было повторно использовать или перерабатывать в более ценные продукты;
- улучшить сортировку полимеров и качество материалов, повысив экономическую эффективность и экономичность переработки [Ayhan Evrensel, 2025];

- снизить зависимость от токсичных химикатов и высокоэнергетических процессов, сделав переработку более экологичной — радиация не делает пластик радиоактивным и считается подходом «зеленой химии»⁷;
- расширить перечень видов пластика, которые можно перерабатывать в промышленных масштабах, и помочь сократить объем отходов, попадающих на свалки или в окружающую среду;
- поддержать экономику замкнутого цикла и промышленную ценность.

Ядерные и изотопные методы также поддерживают высокоточный мониторинг загрязнения микропластиком воды, отложений и биоты. Эти научные инструменты помогают создавать глобальные базы данных и отслеживать тенденции, что позволяет принимать более эффективные политические решения.

NUTEC Plastics привлекла к сотрудничеству десятки стран, оснатив лаборатории и продвигая согласованные методики отслеживания и управления загрязнением пластиком — основу для глобальных договоров или региональных стратегий, что означает более широкое международное сотрудничество. Научные данные и технологические платформы, разработанные в рамках таких инициатив, как NUTEC Plastics, могут способствовать заключению глобальных соглашений по борьбе с загрязнением пластиком и стандартам устойчивого производства в 2030-х годах и далее.

Пилотные проекты сегодня (включая индонезийский) направлены на переход к демонстрационным коммерческим масштабам и промышленному внедрению в середине-конце 2020-х годов⁸.

По мере развития технологий (повышение уровня технологической готовности) более широкое внедрение может значительно увеличить долю перерабатываемого пластика, особенно трудноперерабатываемых полимеров.

Продукция с добавленной стоимостью из облученного пластика может открыть новые экономические секторы для перерабатывающей промышленности и снизить зависимость от первичного пластика. Рынки таких продуктов, как строительные материалы, промышленные композиты и современные полимеры, могут расти по мере того, как переработка с использованием ядерных технологий становится более экономически эффективной.

При широком внедрении и интеграции с традиционными стратегиями переработки и сокращения отходов такие технологии могут внести существенный вклад в замедление или стабилизацию роста загрязнения пластиком, особенно в регионах, где традиционная переработка отстает. Это нововведение не только решает проблему пластиковых отходов, но и способствует более устойчивой экономике замкнутого цикла. Это не просто узкоспециализированный научный проект, а решение одной из самых актуальных экологических проблем и проблем устойчивого развития нашего времени.

Литература / Reference

Электронные ресурсы / Online resources

Arie Widowati, Dari Sampah Jadi Solusi: Cara Cerdas Indonesia Daur Ulang Plastik dengan Teknologi Nuklir, 2025 // MediaPatriot. URL: <https://www.mediapatriot.co.id/2025/07/31/dari-sampah-jadi-solusi-cara-cerdas-indonesia-daur-ulang-plastik-dengan-teknologi-nuklir/> (дата обращения: 21.01.2026).

⁷ How Nuclear Tech Could Revolutionise Plastic Recycling // The IAEA. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/how-nuclear-tech-could-revolutionise-plastic-recycling> (дата обращения: 21.01.2026).

⁸ Utilization of Radiation Technology for Plastic Waste Recycling // Ti Stic. URL: <https://www.ti-stic.org/post/utilization-of-radiation-technology-for-plastic-waste-recycling> (дата обращения: 21.01.2026).

Ayhan Evrensel, Revolutionizing Plastic Recycling Through Irradiation, 2025 // The IAEA. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/revolutionizing-plastic-recycling-through-irradiation> (дата обращения: 21.01.2026).

Esti Utami, Perkembangan NUTEC Plastics di Negara-negara Percontohan, 2025 // Ruang Kota. URL: <https://www.ruangkota.com/lingkungan/245660427/perkembangan-nutec-plastics-di-negara-negara-percontohan> (дата обращения: 21.01.2026).

How Nuclear Tech Could Revolutionise Plastic Recycling // The IAEA. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/how-nuclear-tech-could-revolutionise-plastic-recycling> (дата обращения: 21.01.2026).

IAEA Backs Plastic Recycling in Asia-Pacific // Mirage News. URL: <https://www.miragenews.com/iaea-backs-plastic-recycling-in-asia-pacific-1388620/> (дата обращения: 21.01.2026).

Joanne Liou, NUTEC Plastics: Using Nuclear Technologies to Address Plastic Pollution, 2021 // The IAEA. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/nutec-plastics-using-nuclear-technologies-to-address-plastic-pollution> (дата обращения: 21.01.2026).

Johnny Wood Writer, Plastic waste from Western countries is poisoning Indonesia, 2019 // Forum Agenda. URL: <https://www.weforum.org/stories/2019/12/plastic-waste-indonesia-pollution-health/> (дата обращения: 21.01.2026).

Martha Herlinawati Simanjuntak, BRIN memanfaatkan teknologi nuklir untuk daur ulang sampah plastik Jumat, 2022 // ANTARA News. URL: <https://www.antaranews.com/berita/3179653/brin-manfaatkan-teknologi-nuklir-untuk-daur-ulang-sampah-plastik> (дата обращения: 21.01.2026).

Muhammad Kholid Basyaiban Press Release: Indonesian river is plastic waste emergency. Ecoton survey: 68% of communities need waste facilities and access to complaints 2022 // ECOTON. URL: <https://ecoton.or.id/press-release-indonesian-river-is-plastic-waste-emergency-ecoton-survey-68-of-communities-need-waste-facilities-and-access-to-complaints/> (дата обращения: 21.01.2026).

NUTEC Plastic, Teknologi Nuklir untuk Tekan Polusi Sampah Plastik // Atnews.id. URL: <https://www.atnews.id/portal/news/8586> (дата обращения: 21.01.2026).

Plastic Waste Discharges from Rivers and Coastlines in Indonesia // World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/country/indonesia/publication/plastic-waste-discharges-from-rivers-and-coastlines-in-indonesia> (дата обращения: 21.01.2026).

Primagung Dary Riliananda, Garry Lotulung, Not Our Trash: Indonesia's Struggle with the World's Plastic Waste, 2025 // FairPlanet. URL: <https://www.fairplanet.org/story/not-our-trash-indonesias-struggle-with-the-worlds-plastic-waste/> (дата обращения: 21.01.2026).

Prisca Triferna, Raka Adji, Indonesia races to end plastic waste by 2029 amid rising crisis, 2025 // ANTARA News. URL: <https://en.antaranews.com/news/358689/indonesia-races-to-end-plastic-waste-by-2029-amid-rising-crisis> (дата обращения: 21.01.2026).

Prisca Triferna, Raka Adji, Ministry records 41.68 percent drop in plastic waste leaks into ocean, 2024 // ANTARA News. URL: <https://en.antaranews.com/news/328382/ministry-records-4168-percent-drop-in-plastic-waste-leaks-into-ocean> (дата обращения: 21.01.2026).

Safrezi Fitra, BRIN Kembangkan Daur Ulang Limbah Plastik dengan Teknologi Nuklir, 2024 // Kata data. URL: <https://katadata.co.id/berita/industri/669b5064e4015/brin-kembangkan-daur-ulang-limbah-plastik-dengan-teknologi-nuklir> (дата обращения: 21.01.2026).

Sean Filo Muhamad, BRIN bidik komersialisasi nuklir untuk daur ulang plastik pada 2027 Senin, 2025 // ANTARA News. URL: <https://www.antaranews.com/berita/4653997/brin-bidik-komersialisasi-nuklir-untuk-daur-ulang-plastik-pada-2027> (дата обращения: 21.01.2026).

Toxic tofu? How plastic waste from the west fuels food factories in Indonesia // The Guardian URL: <https://www.theguardian.com/global-development/2025/may/10/tofu-plastic-indonesia> (дата обращения: 21.01.2026).

Utilization of Radiation Technology for Plastic Waste Recycling // Ti Stic. URL: <https://www.ti-stic.org/post/utilization-of-radiation-technology-for-plastic-waste-recycling> (дата обращения: 21.01.2026)..