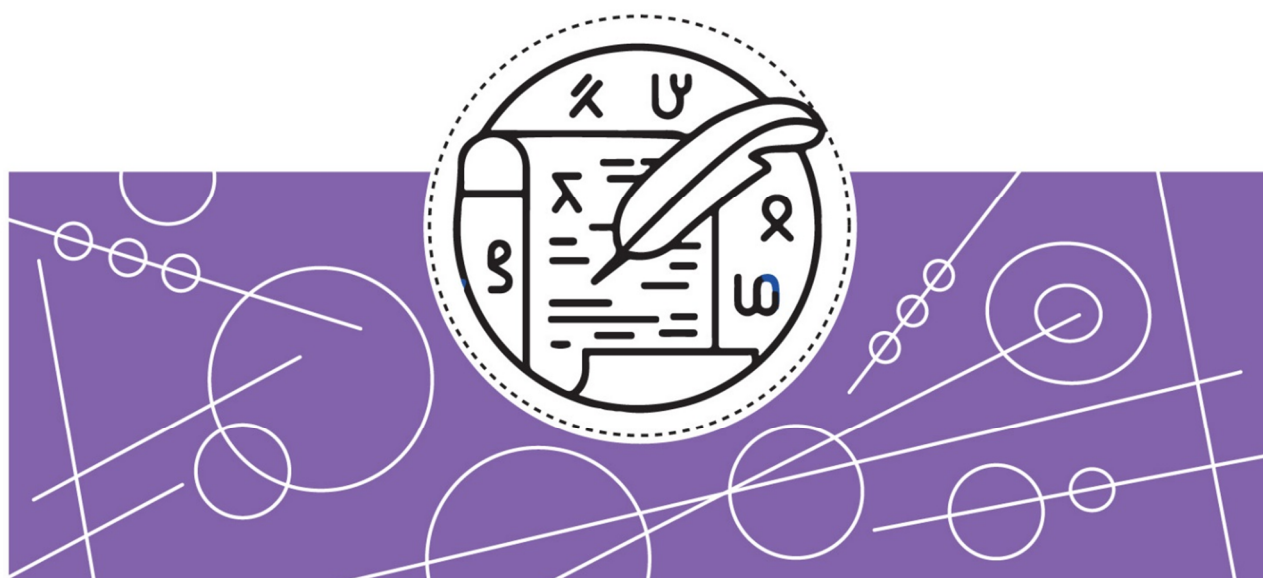


ІІТМО

АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИИ И УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИИ И УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки (специальности) 12.04.04 «Биотехнические системы и
технологии», «18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической
технологии, нефтехимии и биотехнологии»
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования бакалавриата (магистратуры,
специалитета)

ИТМО

Санкт-Петербург

2026

Аспекты экологии и утилизации отходов / Курындин И.С., Носова А.О., Пономарева А.А., [и др.] – СПб: Университет ИТМО, 2026. – 71 с.

Рецензент(ы):

Бочек Александр Михайлович, ведущий научный сотрудник, доцент, доктор химических наук Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» - Институт высокомолекулярных соединений

Учебно-методическое пособие будет полезно в подготовке по дисциплинам «Современные проблемы экологии», «Утилизация и переработка полимерных материалов», «Вторичная переработка материалов», а также при их самостоятельном освоении. Данное пособие предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии», 18.04.02 - "Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии". Учебно-методическое пособие направлено на закрепление знаний и получение систематических представлений о проблемах экологии, снижении негативных воздействий на окружающую среду и стратегиях утилизации отходов различных материалов.

The logo of ITMO University, consisting of the letters 'ITMO' in a bold, black, sans-serif font. The letter 'I' is slightly taller than the others.

Университет ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию: ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). Представлен в мировом ТОП-200 по телекоммуникационным технологиям (Telecommunication engineering), а также в ТОП-300 по нанонаукам и нанотехнологиям (Nanoscience & Nanotechnology) ARWU. Входит в ТОП-200 по инженерным наукам (Engineering and Technology), в ТОП-300 по физике и астрономии (Physics & Astronomy), наукам о материалах (Materials Sciences), а также по машиностроению, аэрокосмической и промышленной инженерии (Mechanical, Aeronautical & Manufacturing Engineering) рейтинга QS. Лидер проекта «Приоритет – 2030».

© Университет ИТМО, 2026

© Курындин И.С., Носова А.О., Пономарева А.А., Мурадова М.В. 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Современные представления об экологии	5
1.1. Экология: предмет, задачи, роль в современном мире	5
1.2. Основы устойчивого развития	8
1.3. Экосистемы и их устойчивость. Биосфера. Ноосфера	11
1.4. Загрязнение окружающей среды	21
1.5. Антропогенное воздействие на окружающую среду	26
1.6. Использование природных ресурсов	34
1.7. Обеспечение экологической безопасности	40
1.8. Экологический мониторинг	43
1.9. Контрольные вопросы	48
2. Аспекты утилизации материалов	49
2.1. Основные понятия	49
2.2. Причины для утилизации отходов	49
2.3. Нормативные документы по обращению с отходами	50
2.4. Стратегии переработки отходов	52
2.5. Способы сортировки отходов	54
2.6. Вторичное использование отходов металлов	56
2.7. Вторичное использование отходов стекла	57
2.8. Вторичная переработка полимеров	58
2.9. Химические методы утилизации полимеров	59
2.10. Термолиз отходов полимеров	61
2.11. Сжигание отходов	62
2.12. Контрольные вопросы	64
Заключение	65
Список использованных источников	66

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, проходящих обучение по направлениям «Биотехнические системы и технологии» и «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии». Данное пособие направлено на обеспечения учебного процесса по дисциплинам «Экология», «Современные проблемы экологии», «Утилизация и переработка полимерных материалов», «Вторичная переработка материалов». Представленная систематизированная информация может быть полезна обучающимся и специалистам в областях, связанных с природопользованием, экологией, ресурсосбережением, разработкой современных материалов и технологий их получения и утилизации.

В результате освоения материалов пособия обучающийся будет знать теоретические основы экологии и основы концепции устойчивого развития, уметь анализировать источники антропогенного загрязнения, предлагать научно обоснованные решения экологических задач, иметь систематические представления о стратегиях утилизации отходов, технологиях и оборудовании для их переработки.

Методическая структура пособия способствует формированию у студентов необходимых компетенций и обеспечивает необходимый уровень подготовки для выполнения профессиональных задач и принятия управленческих решений в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности, а также при разработке технологических схем производств по утилизации различных материалов.

Пособие может быть рекомендовано преподавателям и студентам в качестве опорного конспекта курса лекций. Оно включает 2 раздела, в которых описаны современные представления об экологии, экологической безопасности и утилизации отходов. Каждый раздел сопровождается контрольными вопросами для проверки и закрепления усвоенного материала, которые могут быть использованы преподавателями на практических занятиях или студентами при самостоятельном изучении дисциплины.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭКОЛОГИИ

1.1. Экология: предмет, задачи, роль в современном мире

В эпоху беспрецедентного технологического прогресса и глобализации, когда человечество достигло пика своего воздействия на планету, понимание фундаментальных законов функционирования природы становится не просто академическим интересом, но и жизненно важным императивом. В авангарде понимания стоит экология – наука, чья роль в современном мире невозможно переоценить.

Термин «экология» (от древнегреческих οἶκος — «дом», «жилище», «местообитание» и λόγος — «учение», «наука») был впервые введен немецким биологом Эрнстом Геккелем в 1866 году. Древние греки называли «экосом» любое место для пребывания человека [1].

Современная экология – это комплексная наука, изучающая структуру и функционирование надорганизменных систем (популяций, сообществ, экосистем и биосферы), взаимоотношения организмов и их сообществ друг с другом, а также с абиотическими факторами среды. Предметом её изучения являются закономерности организации жизни на всех уровнях – от отдельного индивидуума и популяции до глобальной биосферы, а также потоки энергии и круговорот веществ, обеспечивающие жизнедеятельность экосистем. В результате достигается понимание того, как организмы адаптируются к среде, как они взаимодействуют между собой и как их деятельность, в свою очередь, изменяет среду обитания. Становится возможным установление сложных причинно-следственных связей, формирующих биологическое разнообразие, устойчивость природных систем и их реакцию на различные антропогенные воздействия.

Богатство предмета изучения предопределило формирование разнообразных разделов экологии (Рис. 1).

Глобальная экология рассматривает экологические процессы на планетарном уровне, функционирование биосферы как единой глобальной экосистемы.

Аутэкология посвящена взаимоотношениям отдельных видов или особей с окружающей средой, исследованию их адаптации, жизненным циклам и реакциям на различные факторы среды.

Демэкология сосредоточена на изучении популяций – групп особей одного вида, живущих на одной территории, их динамики численности, структуры и процессов, определяющих рост или сокращение.

Синэкология рассматривает структуру и функционирование сообществ различных видов и экосистем – сложных систем, включающих как живые организмы, так и их физическое окружение, направляя

внимание, в том числе, на исследования потоков энергии и круговорота веществ.

Палеоэкология изучает условия и среду обитания, жизнь и взаимоотношения организмов геологического прошлого, а также их изменения в процессе исторического развития.

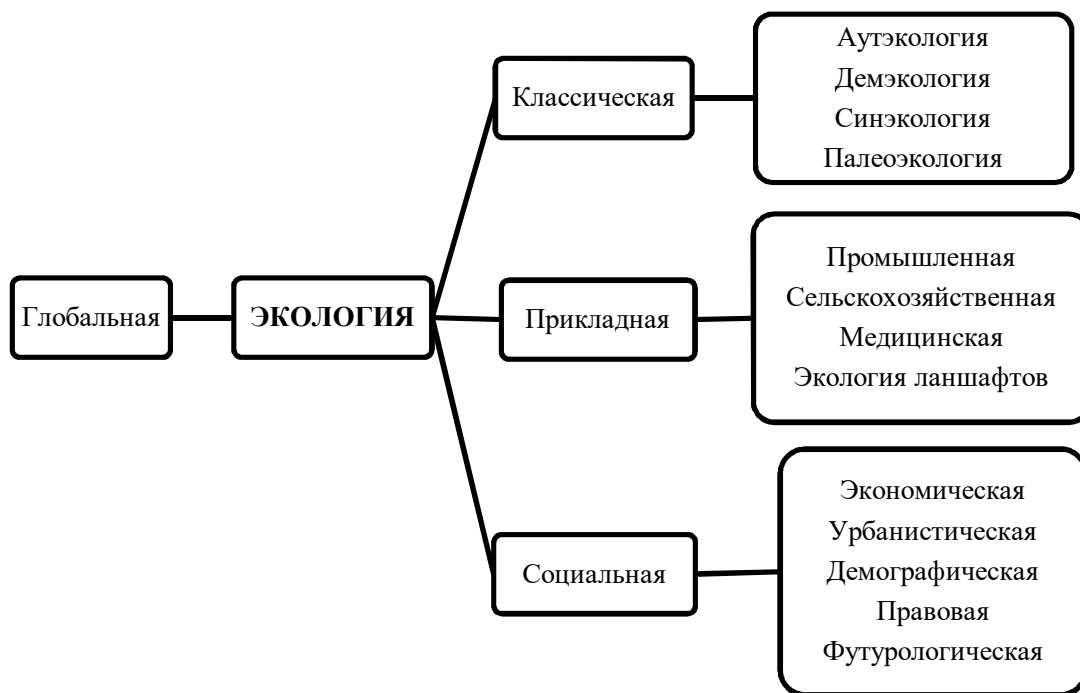


Рисунок 1 – Основные разделы экологии

Различные направления *прикладной экологии* фокусируются на разработке практических решений экологических задач, в которые входят, но не ограничиваются ими, принципы охраны природы, рациональное природопользование, оценка воздействия на окружающую среду, инженерные решения и восстановление деградированных экосистем.

Социальная экология – это междисциплинарное научное направление, изучающее взаимоотношения человеческого общества и окружающей среды, анализирующее сложный комплекс взаимосвязей и взаимовлияний между социальными, экономическими, культурными, политическими аспектами человеческой деятельности и состоянием природных систем.

Также выделяют *геоэкологию*, сосредоточенную на изучении геосфер, их динамики и взаимодействия, геофизических условий жизни, факторов неживой окружающей среды, действующей на организмы.

Развитию такой структуры способствовало, в том числе, и то, что на протяжении последних десятилетий человечество столкнулось с рядом глобальных экологических проблем (изменение климата, утрата

биоразнообразия, загрязнение окружающей среды, деградация земель, истощение природных ресурсов и др.). Экологическое знание выступает в роли ключевого инструмента для понимания этих проблем, прогнозирования и поиска путей их преодоления. К XXI веку экология из преимущественно академической дисциплины, изучающей взаимодействие организмов со средой, трансформировалась в одну из наук, которые определяют будущее цивилизации. Её значение выходит далеко за рамки чисто биологического познания и проникает во все сферы общественной жизни – от экономики и политики до этики и образования. Именно поэтому экология по своей природе является глубоко междисциплинарной наукой, активно взаимодействующей со множеством других областей знания, в том числе биологией, географией, химией, физикой, математикой и статистикой, социологией, экономикой, политологией, философией. Такая конвергенция наук позволяет формировать комплексное видение взаимодействия человека и природы, предлагая не только диагноз, но и пути решения возникающих проблем.

Современная экология аккумулирует множество знаний и решает широкий круг задач, наиболее важными из которых можно считать:

- фундаментальное понимание процессов и диагностику состояния как планеты, так и отдельных экосистем;
- прогнозирование и моделирование последствий антропогенного и природного воздействия на экосистемы;
- разработку решений для формирования концепций рационального природопользования и охраны окружающей среды;
- создание информационной базы для принятия управленческих решений;
- разработку природоохранного законодательства;
- формирование экологического сознания и этики;
- стимулирование инноваций в промышленности, «зеленой» экономики и, вместе с тем, «зеленых» рынков.

«Зеленая» экономика – это модель экономического развития, при которой рост благосостояния сочетается с сохранением природного капитала и снижением экологических рисков.

«Зеленые» рынки – это экономические сегменты, в которых спрос, предложение и финансовые механизмы направлены на поддержание устойчивости через стимулирование экологически эффективных технологий и практик, а также на сохранение природного капитала при учёте социальных и экономических аспектов.

Осознание человечеством неотвратимости современных вызовов и понимание системных взаимосвязей в биосфере привело к формированию новой всеобъемлющей парадигмы – концепции устойчивого развития.

1.2. Основы устойчивого развития

Осознание того, что модель экономического развития XX века, основанная на неограниченном потреблении ресурсов и экстенсивном воздействии на окружающую среду, является тупиковой, зародилось ещё в середине прошлого столетия. Это стало заметным по выходу публикаций, привлекающих внимание к проблемам загрязнения экосистем, например книги Рэйчел Карсон «Безмолвная весна» 1962 года о негативном воздействии пестицидов. Доклад «Пределы роста» 1972 года, подготовленный Массачусетским технологическим институтом для Римского клуба, стал одним из первых научно обоснованных предупреждений о конечности природных ресурсов и рисков экологического коллапса при сохранении текущих темпов развития. Научному сообществу стало понятно, что неограниченный рост потребления и промышленности приведёт к истощению планеты и экологическому кризису. Хотя доклад вызвал много критики, он привлек широкое внимание общественности и политиков к необходимости пересмотра модели экономического развития.

В том же, 1972 году состоялась первая Конференция ООН по окружающей среде в Стокгольме, которая обозначила начало международного сотрудничества в области охраны окружающей среды. На этой конференции, где впервые были озвучены права человека на «свободу, равенство и адекватные условия жизни в окружающей среде», были приняты Стокгольмская декларация, установившая 26 принципов сохранения окружающей среды, и план действий, которые призывали к глобальным усилиям по охране природы и признавали тесную связь между развитием и состоянием окружающей среды.

Ключевым этапом в развитии концепции устойчивого развития и вехой в формировании современной парадигмы стал доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию «Наше общее будущее» (также известный как доклад Брундтланд), опубликованный в 1987 году. В данном документе было дано классическое определение, ставшее основой для всех последующих международных инициатив:

Устойчивое развитие – это такое развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности [2].

Доклад Брундтланд подчеркнул взаимосвязь между экономическим развитием, социальной справедливостью и экологической устойчивостью, а также необходимость интегрированного подхода к решению глобальных проблем.

Спустя пять лет после доклада Брундтланд, в 1992 году, состоялась историческая Конференция ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро (ЮНСЕД или «Саммит Земли»), на которой были приняты

такие важнейшие документы, как «Повестка дня на XXI век», представляющий собой комплексный план действий по устойчивому развитию, Декларация Рио (один из основных источников экологического права), а также Рамочная конвенция ООН об изменении климата и Конвенция о биологическом разнообразии. Конференция обозначила устойчивое развитие как глобальный приоритет, требующий участия всех государств. Последующие десятилетия были посвящены имплементации принятых решений. На Всемирном саммите по устойчивому развитию в Йоханнесбурге 2002 года был оценен прогресс, выявлены новые вызовы и подтверждена приверженность концепции устойчивого развития. Конференция «Рио+20» 2012 года в Рио-де-Жанейро стала своего рода «перезагрузкой»: была утверждена декларация «Будущее, которого мы хотим», в которой главы 192 государств подтвердили свою политическую приверженность устойчивому развитию. Кульминацией процесса становления на путь устойчивого развития стало принятие Генеральной Ассамблеей ООН в 2015 году «Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», включающей 17 целей устойчивого развития (ЦУР) и 169 связанных с ними задач. ЦУР стали универсальным стратегическим планом для всех стран, охватывающей широкий спектр вопросов – от искоренения бедности и голода до обеспечения здоровья, образования, гендерного равенства, борьбы с изменением климата и сохранения экосистем.

Современное понимание концепции устойчивого развития выходит далеко за рамки простого сохранения окружающей среды, потому как это *комплексный подход*, интегрирующий экономические, социальные и экологические аспекты развития, признающий их взаимосвязь и взаимозависимость. Авторы [3] сформулировали определение «устойчивого развития» следующим образом:

Устойчивое развитие – это такое общественное развитие, при котором не разрушается его природная основа, создаваемые условия жизни не влекут деградации человека и социально-деструктивные процессы не развиваются до масштабов, угрожающих безопасности общества.

Концепция базируется на *триединой цели*, которая объединяет взаимосвязанные и взаимозависимые экологическую устойчивость, социальную справедливость и экономическое процветание (Рис. 2). Данные направления часто называют «тремя столпами» или «тремя измерениями».

В современном мире перед концепцией устойчивого развития стоят сложные и масштабные задачи, требующие скоординированных усилий на глобальном, национальном и местном уровнях. Среди наиболее актуальных задач можно выделить:

– борьбу с изменением климата, которое является одной из самых серьёзных угроз для планеты и человечества и для предотвращения

которой необходимы сокращение выбросов парниковых газов, переход к возобновляемой энергетике, повышение энергоэффективности и адаптация к последствиям изменения климата.

– сохранение биоразнообразия, утрата которого представляет собой проблему для устойчивости экосистем и благополучия человека.

– переход к циркулярной экономике, основанной на принципах повторного использования, переработки и восстановления ресурсов, а также осознанном потреблении и производстве.

– укрепление глобального партнерства для координации усилий на глобальном, региональном, национальном и местном уровнях, обмена знаниями и технологиями.

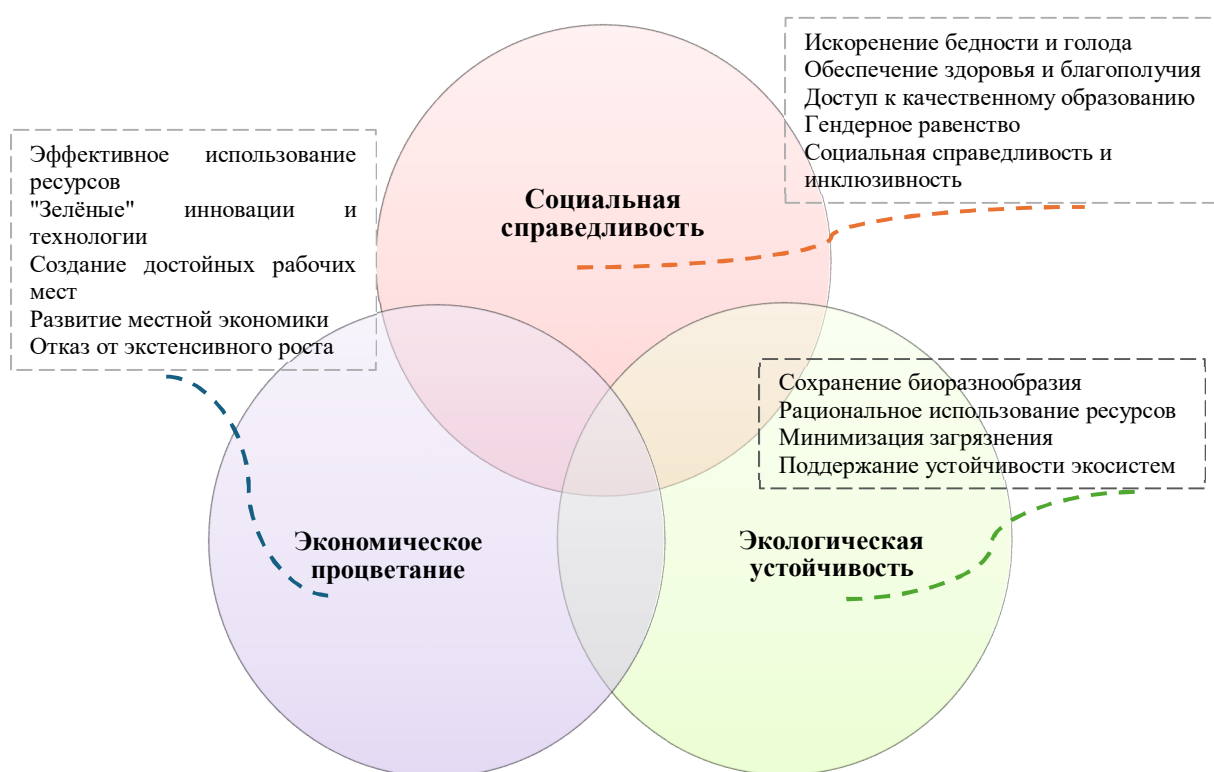


Рисунок 2 – Триединая цель устойчивого развития

В контексте триединой цели устойчивого развития осознанное потребление ресурсов выступает как один из наиболее мощных и доступных инструментов для каждого индивидуума и общества в целом.

Осознанное потребление – это один из пунктов в списке ЦУР и подход к выбору и использованию товаров и услуг, который основан на понимании их полного жизненного цикла (с возникновения потребности в товаре или услуге до утилизации), оценке экологических, социальных и этических последствий этого выбора, а также стремлении минимизировать негативное воздействие и максимизировать позитивный вклад.

Важно отметить, что это не просто модный тренд, а фундаментальный сдвиг в отношении к приобретению и использованию ресурсов, напрямую влияющий на все три столпа триединой цели. Вклад в экологическую устойчивость заключается в снижении антропогенной нагрузки на экосистемы за счет рационального использования природных ресурсов и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Вклад в социальную устойчивость выражается в поддержке этичного производства, снижении неравенства, укреплении здоровья, поддержке локального малого бизнеса. Вклад в экономическую устойчивость проявляется в стимулировании циркулярной экономики, развитии «зеленых» рынков и обеспечении долгосрочной экономии для потребителей за счет снижения совокупной стоимости владения продуктами и услуг, создании стимулов для бизнеса к разработке таких продуктов, которые легко ремонтируются, могут использоваться повторно или перерабатываться.

Становится очевидным, что реализация концепции устойчивого развития – это не просто набор международных деклараций или экономических стимулов, но и фундаментальное переосмысление взаимоотношений человечества с окружающей средой, для которого необходимо понимание базовых единиц природной организации – экосистем, формирующих каркас биосферы. Именно их способность поддерживать равновесие, сопротивляться внешним возмущениям и восстанавливаться после них – то есть их устойчивость – является залогом реализации всех аспектов устойчивого развития. Без функционально здоровых и устойчивых экосистем невозможно обеспечить реализацию триединой цели.

1.3. Экосистемы и их устойчивость. Биосфера. Ноосфера

Экосистемы представляют собой сложные и динамичные системы, поддерживающие жизнь на Земле. Их равновесие и устойчивость – основополагающие характеристики, которые обеспечивают способность к выполнению жизненно важных функций.

В рамках экологии жизнь рассматривается на нескольких иерархических уровнях, каждый из которых обладает своими уникальными характеристиками и закономерностями, но при этом тесно связан с нижележащими и вышележащими структурами. Традиционно выделяют пять основных уровней организации (Рис. 3), которые в совокупности формируют единый каркас [4].

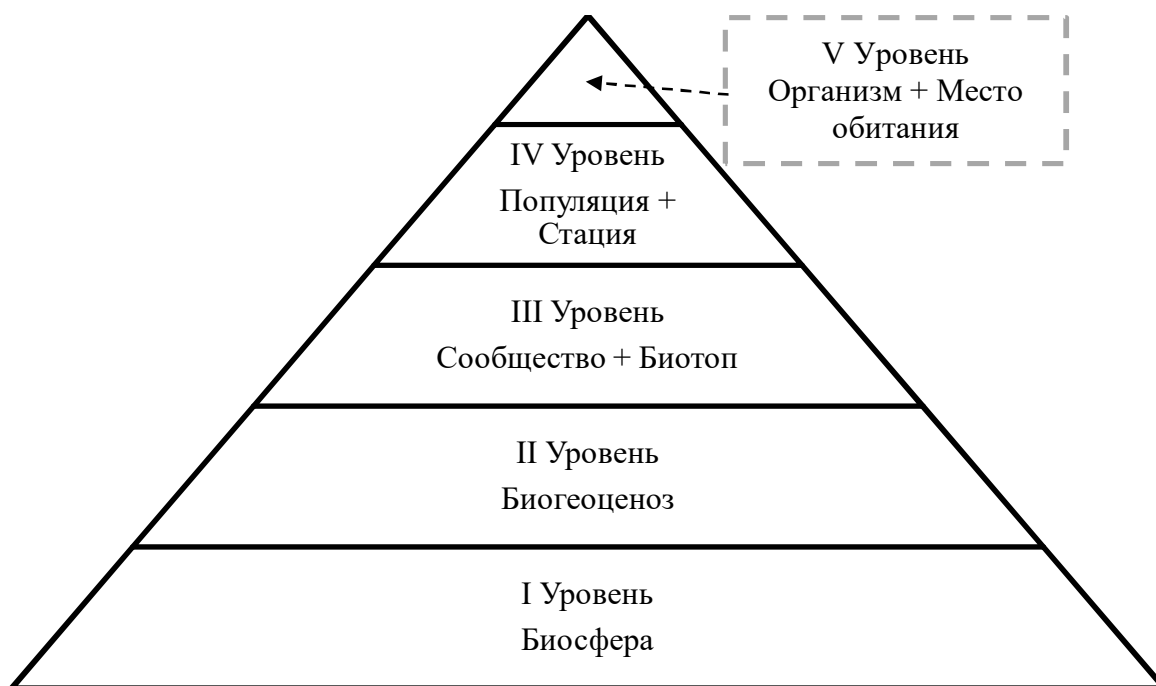


Рисунок 3 – Экосистемы различных уровней организации

На V уровне находится *организм* и его место обитания. На этом уровне изучаются адаптации организма к факторам среды, его жизненный цикл и поведение. И хотя отдельный организм не является экосистемой, данный уровень служит фундаментом для формирования всех более сложных экологических систем.

На IV уровне расположилась популяция и стация. *Популяция* – это совокупность особей одного вида, которая длительное время обитает на определенной территории, свободно скрещивается и частично или полностью изолирована от других популяций того же вида. *Стация* – это определённый участок пространства среды, который обладает совокупностью условий (рельефа, климата, пищи, убежища и т.д.), необходимых для существования и проживания на нём определённого вида животных. Понятие стация применяется только по отношению к виду [4].

Сообщество (или биоценоз) на III уровне объединяет все взаимосвязанные и взаимозависимые виды организмов (растений, животных, грибов, микроорганизмов), обитающие на определенной территории.

II уровень занимает *биогеоценоз* – устойчивая саморегулирующаяся экологическая система, основной функциональный уровень, объединяющий сообщество живых организмов (биоценоз) с абиотическими (неживыми) факторами окружающей среды (биотопом).

На высшем, I уровне организации, находится *биосфера* – совокупность всех экосистем планеты.

Определение *экосистемы* может быть сформулировано следующим образом – это взаимосвязанная единая функциональная совокупность организмов и среды их обитания [4]. Если раскрыть определение более подробно, то экосистема – это совокупность совместно обитающих организмов (биоценоз) и условий их существования (биотоп), находящихся в закономерной взаимосвязи друг с другом и образующих систему взаимосвязанных биотических и абиотических компонентов (Рис. 4), объединенных потоком энергии и круговоротом веществ.

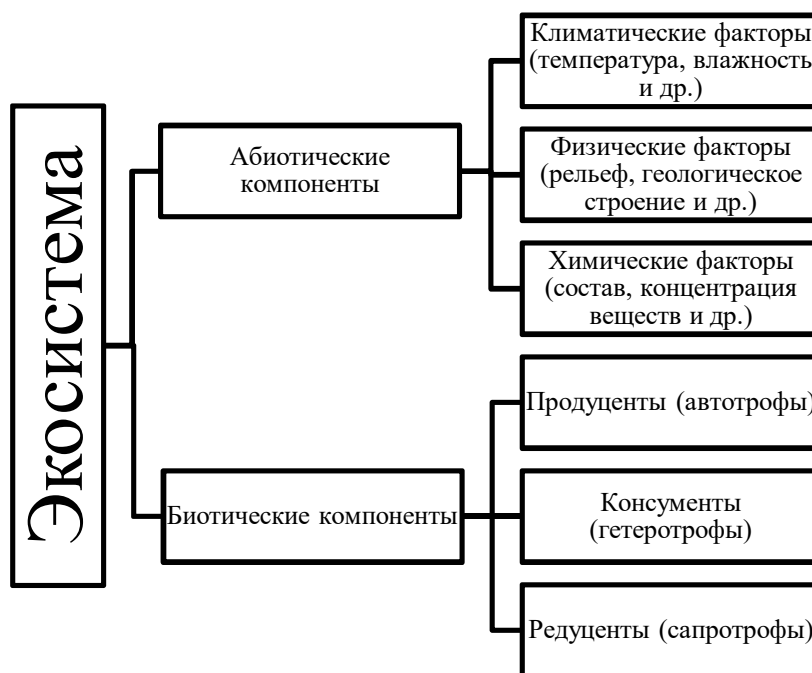


Рисунок 4 – Компоненты экосистемы

Абиотические компоненты представляют собой комплекс неорганических факторов среды, оказывающих непосредственное влияние на живые организмы. Совокупность абиотических факторов формирует биотоп — среду обитания биоценоза. Основными абиотическими компонентами являются:

- свет;
- температура;
- влажность;
- химические параметры среды;
- почвенные и субстратные свойства;
- динамические физические факторы (ветер, волны, ледовый режим, давление и пр.).

Биотические компоненты, в свою очередь, представляют собой совокупность всех живых организмов, населяющих экосистему и образующих биоценоз. Организующим началом биоценоза являются

трофические связи, определяющие структуру и потоки энергии в системе. В зависимости от выполняемой роли в экосистеме живые организмы подразделяются на три функциональные группы:

– *продуценты (автотрофы)* – это организмы, обладающие способностью к автотрофному питанию, то есть синтезу органических веществ из неорганических соединений с использованием энергии солнечного света (фотоавтотрофы, в основном растения и цианобактерии) или химических реакций (хемоавтотрофы, например, серобактерии и нитрифицирующие бактерии). Продуценты формируют первый трофический уровень и являются первичными производителями органического вещества и энергии в экосистеме.

– *консументы (гетеротрофы)* – это организмы, не способные к самостоятельному синтезу органических веществ и потребляющие готовые органические соединения, созданные продуцентами или другими консументами. Консументы подразделяются на консументов первого порядка (травоядные животные, питающиеся продуцентами), консументов второго порядка (хищники, питающиеся травоядными) и консументов более высоких порядков (хищники, питающиеся другими хищниками). Консументы обеспечивают перераспределение энергии и органического вещества по пищевой цепи.

– *редуценты (сапротрофы)* – это организмы, которые разлагают мертвое органическое вещество (детрит) и продукты жизнедеятельности живых организмов до простых неорганических соединений. К редуцентам относятся бактерии, грибы, а также некоторые беспозвоночные (например, дождевые черви). Редуценты возвращают элементы питания в абиотическую среду.

Существуют различные типы взаимодействия между организмами:

- конкуренция (за ресурсы: пищу, свет, пространство);
- хищничество и паразитизм;
- мутуализм и симбиоз (взаимовыгодные связи, микориза, фиксация азота);

Последовательность организмов, в которой каждый предыдущий организм служит пищей для последующего, называется *пищевой цепью*. Каждый организм в пищевой цепи занимает определенный трофический уровень. Выделяют два основных типа пищевых цепей: пастбищный и детритный (Рис. 5).

В качестве примера пастбищного типа можно привести цепь «Трава → заяц → лиса → волк», а детритного – «Опавшие листья → дождевой червь → крот → лиса».

В реальных экосистемах пищевые цепи редко существуют в чистом виде. Большинство организмов имеют разнообразный рацион питания и могут быть звеньями нескольких цепей. Это приводит к формированию сложных пищевых сетей, которые представляют собой совокупность

переплетающихся цепей. Пищевые сети обеспечивают большую устойчивость экосистемы к нарушениям, так как потеря одного вида не всегда приводит к коллапсу всей системы благодаря наличию альтернативных источников питания. При передаче энергии по трофическим уровням действует «правило экологической пирамиды» или «правило 10 процентов»: только около 10% энергии, накопленной на одном трофическом уровне, переходит на следующий. Остальная часть энергии теряется в результате метаболических процессов (дыхания, движения), неполного потребления биомассы или выделяется в виде тепла. Это правило объясняет, почему в экосистемах ограниченное количество трофических уровней (обычно 3–5) и почему биомасса продуцентов всегда значительно превышает биомассу консументов высших порядков.

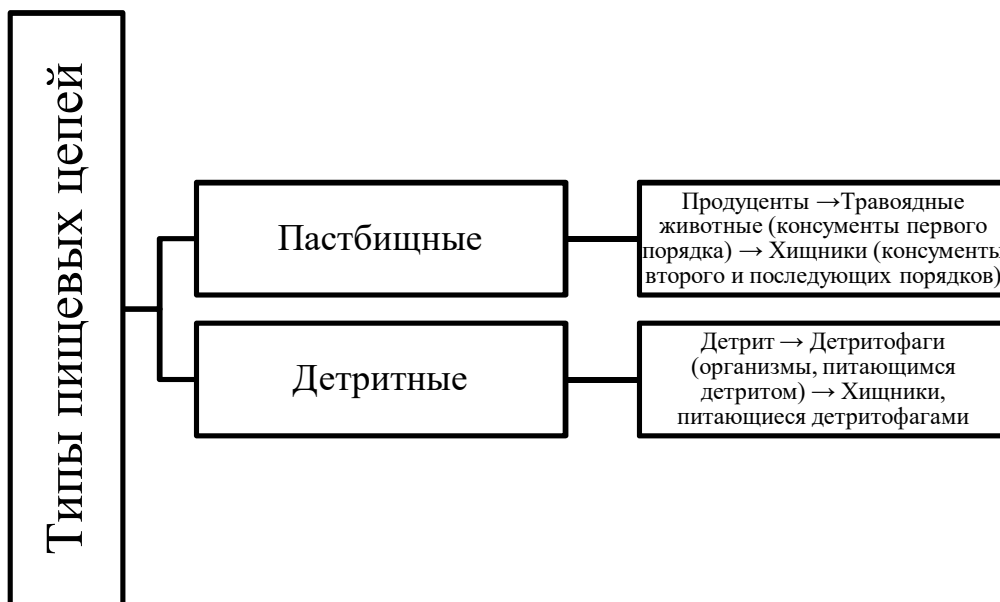


Рисунок 5 – Типы пищевых цепей

Важнейшим процессом, обеспечивающим функционирование и устойчивость экосистемы, является *круговорот веществ (биогеохимические циклы)*. В отличие от энергии солнечного света, которая поступает в экосистему извне и рассеивается в виде тепла, вещества (химические элементы и соединения) циркулируют внутри экосистемы, переходя из абиотической среды в биотическую и обратно. Каждый биогеохимический цикл включает в себя несколько ключевых резервуаров и потоков. Основными резервуарами являются атмосфера, гидросфера, литосфера. Основные биогеохимические циклы представлены в таблице 1.

Круговорот веществ обеспечивает постоянное поступление необходимых элементов для поддержания баланса в экосистеме.

Таблица 1 – Основные биогеохимические циклы

Цикл	Краткое описание
Круговорот воды (гидрологический цикл)	Вода является ключевым растворителем и средой для всех жизненных процессов, а её круговорот – крупнейшим из всех биогеохимических циклов. Начинается с испарения воды с поверхности океанов, морей, озер, рек и суши, а также транспирации воды растениями. Образовавшийся водяной пар поднимается в атмосферу, где охлаждается и конденсируется, образуя облака. Затем вода возвращается на поверхность Земли в виде осадков. Часть осадков просачивается в почву в виде грунтовых вод, другая часть стекает по поверхности, образуя ручьи, реки и в конечном итоге возвращается в океаны. Третий путь – непосредственное поглощение растениями.
Круговорот углерода	Углерод является основой всех органических молекул. Основными резервуарами углерода являются атмосфера (в виде углекислого газа), океаны (растворенный углекислый газ и карбонаты), биомасса (живые организмы и мёртвая органика) и литосфера (ископаемое топливо, карбонатные породы). Из атмосферы углерод поглощается продуцентами (растениями, водорослями) в процессе фотосинтеза, где он преобразуется в органические соединения, которые передаются по пищевым цепям к консументам. Часть углерода возвращается в атмосферу в виде углекислого газа в процессе дыхания всех живых организмов. После гибели организмов их органические остатки разлагаются редуцентами, высвобождая углекислый газ в атмосферу или гидросферу. Часть углерода запасается в почве или в донных отложениях. На протяжении миллионов лет накопленная органическая материя превращалась в ископаемое топливо, представляющее собой долгосрочный резервуар углерода в литосфере.
Круговорот азота	Азот – незаменимый компонент белков, нуклеиновых кислот (ДНК, РНК) и других жизненно важных органических соединений. Несмотря на то, что атмосфера Земли на 78% состоит из газообразного азота, большинство организмов не могут использовать его напрямую. Единственный путь поступления атмосферного азота в экосистемы — это азотфиксация, осуществляемая некоторыми бактериями, которые переводят N_2 в аммоний (NH_4^+), доступный для растений. Аммоний может быть преобразован другими бактериями в нитриты (NO_2^-) и затем в нитраты (NO_3^-), которые также легко усваиваются растениями. Далее азот передается по пищевым цепям к консументам. После гибели организмов или с их экскрементами органический азот разлагается редуцентами до аммония. В анаэробных условиях денитрифицирующие бактерии преобразуют нитраты обратно в газообразный азот (N_2), который возвращается в атмосферу, замыкая цикл.
Круговорот фосфора	Фосфор – ключевой элемент для образования АТФ (основного источника энергии в клетках), ДНК, РНК, клеточных мембран и костной ткани. В отличие от углерода и азота, у фосфора отсутствует значительная газовая фаза, поэтому его круговорот является преимущественно осадочным (литосферным). Фосфор высвобождается из горных пород в процессе выветривания и эрозии и попадает в почву и воду в виде фосфат-ионов (PO_4^{3-}). Растения поглощают фосфаты. Далее фосфор передается по пищевым цепям к консументам. После гибели организмов редуценты разлагают их остатки и возвращают фосфаты в почву и воду. Значительная часть фосфора осаждалась на дне океанов в виде нерастворимых солей и выводится из активного круговорота на длительные геологические периоды.

Экосистема находится в состоянии динамического равновесия, то есть в постоянном изменении и колебаниях, обусловленных внутренними взаимодействиями и внешними воздействиями.

Экологическое равновесие – это состояние относительной стабильности экосистемы, при котором численность популяций и соотношение видов остаются относительно постоянными, а потоки энергии и круговорот веществ сбалансированы.

Однако экосистемы подвержены различным нарушениям как природного (пожары, наводнения, засухи и др.), так и антропогенного (загрязнение, вырубка лесов, изменение климата и др.) характера. После нарушения экосистема может восстанавливаться и проходит через последовательность изменений, называемую экологической сукцессией.

Экологическая сукцессия – это последовательная смена биоценозов на определенной территории в результате изменения условий среды. Сукцессии могут быть первичными и вторичными (Рис. 6).

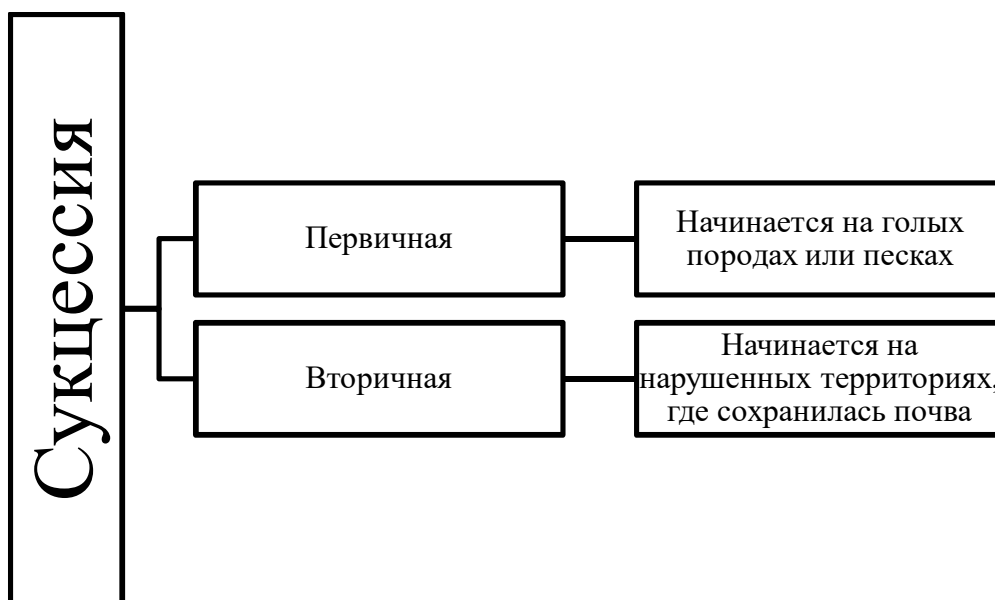


Рисунок 6 – Виды экологической сукцессии

В ходе сукцессии происходит увеличение биоразнообразия, усложнение структуры экосистемы и увеличение биомассы. Конечной стадией сукцессии является климаксное сообщество – относительно стабильное сообщество, находящееся в равновесии с окружающей средой.

Функционирование экосистем определяется совокупностью различных *экологических факторов* (свойств среды обитания, определяющих условия метаболизма организма и биогеоценоза в целом): абиотических, биотических и антропогенных (Рис. 7).



Рисунок 7 – Классификация экологических факторов

Совокупность экологических факторов формирует специфические условия среды, определяющие экологическую нишу каждого вида и лимитирующие его распространение в соответствии с *законом толерантности Шелфорда*, согласно которому каждый организм имеет определенные пределы выносливости по отношению к каждому экологическому фактору, за пределами которых его существование становится невозможным.

Изучение отдельных экосистем и их компонентов закономерно приводит к рассмотрению всей планеты как единой, взаимосвязанной экологической системы – *биосферы*. Биосфера представляет собой глобальную экосистему, охватывающую все области Земли, где существует жизнь, которая включает в себя нижнюю часть атмосферы (тропосферу), гидросферу (все водные объекты) и верхнюю часть литосферы (земную кору). Именно в биосфере протекают все основные биогеохимические циклы и формируется климат планеты.

Биосфера – это область распространения жизни на Земле, включающая нижнюю часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы.

Основные компоненты биосферы представлены на Рис. 8.



Рисунок 8 – Основные компоненты биосферы

Биосфера состоит из различных биомов (крупных зональных экосистем) – лесов, степей, пустынь, тундр, океанов, морей, озер и рек. Каждый биом характеризуется определенным климатом, почвой, растительностью и животным миром.

Биосфера выполняет ряд жизненно важных функций, которые обеспечивают существование жизни на Земле:

- аккумуляция солнечной энергии;
- круговорот веществ;
- регулирование климата;
- формирование почвы и др.

Важнейшим условием устойчивости биосферы и её способности адаптироваться к изменениям окружающей среды является *биоразнообразие* – разнообразие живых организмов на всех уровнях организации: генетическом, видовом и экосистемном (таблица 2).

В настоящее время биоразнообразие находится под угрозой из-за чрезмерного антропогенного воздействия. В частности, вырубка лесов, распашка земель, строительство дорог и городов приводят к уничтожению и разделению экосистем, что нарушает экологические связи. Кроме того, загрязнение воздуха, воды и почвы химическими веществами, отходами и радионуклидами оказывает негативное влияние на живые организмы и снижает биоразнообразие. Изменение климата приводит к изменению условий обитания, что вызывает миграцию, вымирание и изменение

видового состава экосистем. Интродукция чужеродных видов может приводить к вытеснению местных видов и нарушению экологического равновесия. Чрезмерная эксплуатация природных ресурсов приводит к истощению запасов, деградации экосистем и снижению биоразнообразия. Сохранение биоразнообразия является одной из главных задач устойчивого развития и сохранения функций биосферы Земли.

Таблица 2 – Виды биоразнообразия

Наименование	Описание
Генетическое	Разнообразие генетического материала внутри вида. Обеспечивает возможность адаптации к изменяющимся условиям среды, устойчивость к болезням и вредителям.
Видовое	Количество видов, обитающих в определенной экосистеме или регионе. Обеспечивает разнообразие трофических связей, устойчивость к нарушениям и выполнение различных функций в экосистеме.
Экосистемное	Разнообразие экосистем на Земле. Обеспечивает разнообразие условий обитания, генетического материала и видов, а также выполнение различных функций в биосфере в целом.

Продолжая рассуждения о биосфере, следует рассмотреть и концепцию *ноосферы* (от греч. νοῦς — «разум» и σφαῖρα — «шар»), которая была независимо разработана французским математиком и философом Эдуардом Леруа, палеонтологом Пьером Тейяром де Шарденом и, в особенности, выдающимся русским учёным В.И. Вернадским.

Ноосфера (по Вернадскому) – это качественно новое состояние биосферы, при котором разумная деятельность человека становится определяющим фактором её развития [6]. Это не просто сфера, заселенная человеком, а сфера, преобразованная его мыслью и трудом. Если биосфера развивалась под воздействием геологических и биологических процессов, то ноосфера характеризуется целенаправленным и осознанным воздействием человечества на природу.

Некоторыми ключевыми аспектами концепции ноосферы являются:

- единство биосферы и человечества;
- геологическая сила человека - он начинает играть определяющую роль в геологических и биосферных процессах;
- ответственность разума;
- сознательное регулирование;

– единое мировое объединение для успешного развития и управления планетой.

Концепция ноосферы, хотя и не лишена критики, тесно перекликается с идеями устойчивого развития. Оба подхода призывают к сознательному управлению ресурсами и процессами на планете для того, чтобы обеспечить благополучие нынешних и будущих поколений. Устойчивое развитие можно рассматривать как практический путь к построению ноосферы, где разум человека используется для достижения равновесия между обществом и природой, а не для её разрушения.

Очевидно, что стабильность природных систем является необходимым условием для реализации концепции устойчивого развития. Становится понятно, как сложны и взаимосвязаны потоки энергии и круговороты веществ, обеспечивающие экологическое равновесие и поддерживающие биоразнообразие. Однако «геологическая сила человека», о которой говорил В.И. Вернадский, не всегда проявляется созидательно. В условиях стремительного индустриального и технологического развития эта сила зачастую становится источником дестабилизирующего воздействия на окружающую среду. Нарушение циклов, деградация местообитаний и угроза биоразнообразию – это прямые следствия неконтролируемой антропогенной активности. Одним из наиболее острых и повсеместных проявлений такого деструктивного воздействия является *загрязнение окружающей среды*, которое подрывает способность экосистем к саморегуляции и поддержанию устойчивости.

1.4. Загрязнение окружающей среды

В стремительном развитии цивилизации антропогенное воздействие часто становится незримым, однако всепроникающим дестабилизатором, угрожающим самой основе природного благополучия – чистоте и здоровью окружающей среды. Ее разнообразное загрязнение – это один из наиболее острых на сегодняшний день вызовов, который способен подрывать возможность экосистем к саморегуляции и ставить под угрозу здоровье живых существ.

Загрязнение окружающей среды – это привнесение в природную среду или возникновение в ней новых, обычно не характерных для нее физических, химических, биологических, информационных и иных агентов, а также превышение естественного среднесуточного уровня концентрации уже имеющихся веществ, которое ведет к негативным последствиям для живых организмов и экосистем.

Загрязнение можно классифицировать по различным критериям (Рис. 9).

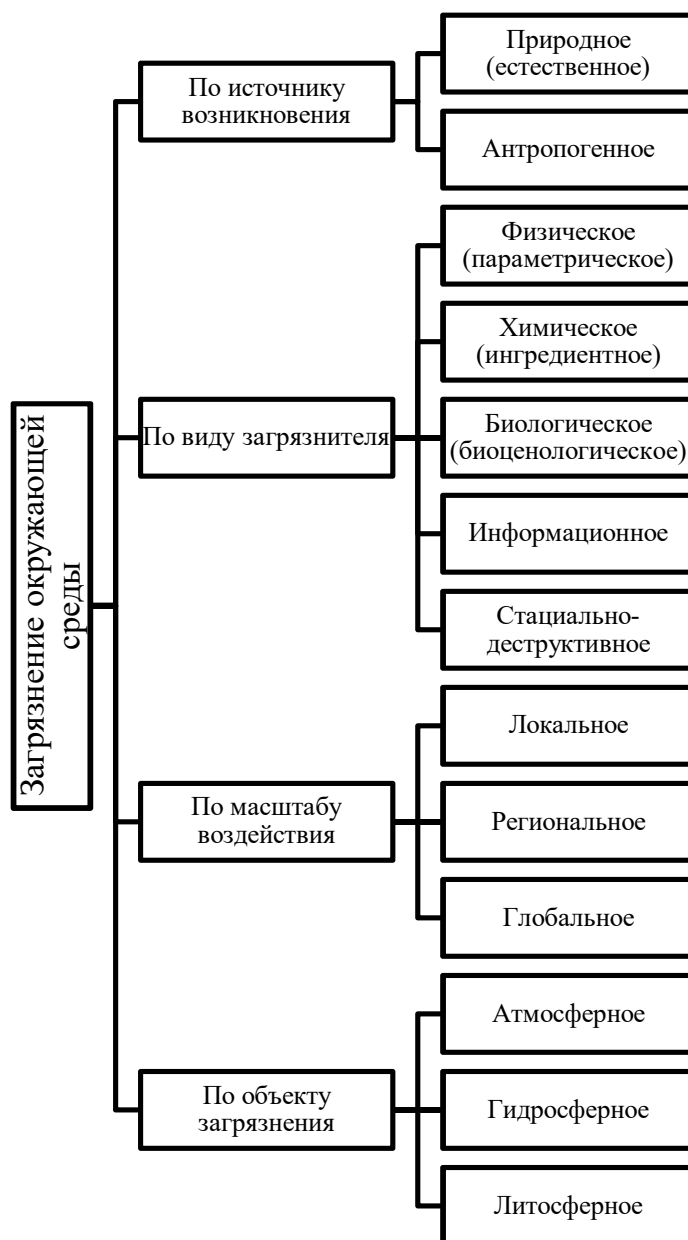


Рисунок 9 – Классификация источников загрязнения окружающей среды

Прежде всего, загрязнения разделяют по источнику возникновения на *природные (естественные)* и *антропогенные*. Природное загрязнение возникает в результате естественных процессов (к примеру, вулканические извержения, пыльные бури или лесные пожары), в то время как антропогенное загрязнение является прямым следствием деятельности человека (выбросы промышленных предприятий, транспортные выхлопы, сельскохозяйственные отходы и др.).

Физическое загрязнение связано с изменением физических параметров среды и включает в себя тепловое, шумовое, световое, радиационное, электромагнитное и механическое воздействие. *Химическое загрязнение* обусловлено привнесением в окружающую среду чужеродных

химических веществ или увеличением концентрации естественных до уровней, превышающих допустимые. *Биологическое загрязнение* возникает при попадании в экосистемы нежелательных видов организмов или патогенных микроорганизмов. *Информационное загрязнение*, хотя и косвенно влияет на состояние экосистем, связано с избытком или недостоверностью информации и играет значительную роль в формировании экологического сознания и политики. Отдельно можно выделить *стабилизационно-деструктивное* загрязнение – это загрязнение, связанное с нарушением и преобразованием ландшафтов и экосистем в процессе природопользования.

По масштабу воздействия можно выделить *локальное* (загрязняется небольшая территория, например, конкретное озеро), *региональное* (затрагивает значительно большие территории) и *глобальное* загрязнение (охватывает всю планету или её значительную часть).

По объекту загрязнения различают загрязнение *атмосферы, гидросферы и литосферы*.

Загрязнение окружающей среды – не просто совокупность вредных веществ и случайных аварий. Это системное и постепенное искажение природных процессов, последствия которого разнообразны (от локальных изменений трофических связей до глобальных сдвигов климата и утраты биологического разнообразия) и зачастую проявляются не одномоментно, а через накопление, трансформацию и многократное перекрёстное влияние многочисленных загрязнителей (Рис. 10). Их источники разнообразны:

– *Промышленность*. Один из ведущих источников разнообразных загрязнителей. Металлургические, химические, нефтеперерабатывающие, целлюлозно-бумажные и иные предприятия выбрасывают в атмосферу колоссальные объемы газообразных и твердых загрязнителей (SO_x , NO_x , фенолы, тяжелые металлы, пыль), сбрасывают в водоемы токсичные сточные воды, генерируют огромные объемы промышленных отходов, содержащих опасные химические соединения. Добыча полезных ископаемых также приводит к значительной деградации ландшафтов, пылению и загрязнению грунтовых вод.

– *Энергетика*. Предприятия по производству энергии, особенно тепловые электростанции, работающие на ископаемом топливе (уголь, нефть, газ), являются основным источником выбросов парниковых газов, оксидов серы и азота, твердых частиц, а также теплового загрязнения водоемов. Атомная энергетика, при всей своей чистоте в процессе работы, сопряжена с риском радиационного загрязнения в случае аварий и проблемой утилизации высокоактивных радиоактивных отходов.

– *Сельское хозяйство*. Интенсификация агротехнологий приводит к значительному загрязнению окружающей среды. Использование минеральных удобрений вызывает эвтрофикацию водоемов (избыточного роста водорослей из-за поступления азота и фосфора), пестициды

загрязняют почвы, воды и пищевые продукты, при этом наносят вред как целевым, так и нецелевым организмам. Животноводство является источником выбросов парниковых газов (метана и закиси азота), а также загрязнения вод и почв органическими отходами и антибиотиками.

– *Транспорт*. Миллионы автомобилей, самолетов, судов и железнодорожного транспорта выбрасывают в атмосферу внушительные объемы выхлопных газов, включающих монооксид углерода, оксиды азота, углеводороды, сажу и др. Транспорт также – значительный источник шумового загрязнения, а изношенные шины – источник микропластика.

– *Жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ)* аккумулирует ежедневное образование огромных объемов твердых бытовых отходов, большая часть которых складывается на свалках и полигонах. Данные объекты являются источниками загрязнения почв и грунтовых вод токсичными свалочными фильтратами, а также выбросов метана и диоксида углерода. Сточные воды городов, содержащие органические вещества, патогенные микроорганизмы, фармацевтические препараты и микропластик, при недостаточной очистке загрязняют водоемы.

Загрязнение окружающей среды – это не всегда дымящие трубы заводов или горы мусора. Многие современные загрязнители не видны невооруженным глазом, и их воздействие не всегда очевидно. Они могут накапливаться в почве, воде, воздухе и даже в организмах живых существ, нанося вред здоровью и экосистемам. Эти «скрытые угрозы» требуют особого внимания и изучения, чтобы прогнозировать ущерб и разрабатывать эффективные меры по их контролю и предотвращению.

Синтетические полимерные материалы, изобретенные более века назад, способствовали революции в жизни человечества и стали незаменимым материалом во многих отраслях. Однако широкое использование полимерных изделий привело к серьезной проблеме – загрязнению окружающей среды не только крупными объектами. Особую тревогу вызывает микропластик – крошечные синтетические частицы, которые, несмотря на свой размер, потенциально могут оказывать негативное влияние на экосистемы и на сегодняшний день были обнаружены в воздухе, почве, воде, а также в живых организмах и продуктах питания.

Микропластик – это потенциально токсичный и стойкий загрязнитель окружающей среды, представляющий собой гетерогенную совокупность пластмассовых частиц различного химического состава, плотности, формы, цвета, первично произведенных или образованных в процессе деградации и фрагментации пластмассовых объектов под воздействием внешних факторов, а также характеризующихся размером от 1 мкм до 5 мм. Частицы, размер которых составляет менее 1 мкм, можно отнести к *нанопластику* (НП).



Рисунок 10 – Основные загрязнители окружающей среды

Микропластик классифицируется на:

- *первичный* (изначально произведен в виде микроскопических частиц для конкретных целей, например, микрогранулы для косметических скрабов, абразивы для промышленной очистки и пр).

- *вторичный* (образуется в результате фрагментации более крупных пластиковых изделий под воздействием солнечного света (УФ-излучения), ветра, волн, трения и других факторов окружающей среды. Источниками вторичного микропластика являются пластиковые бутылки, пакеты, рыболовные сети, шины и другие отходы.

Микрочастицы попадают в окружающую среду различными путями:

- с бытовыми сточными водами, содержащими микрогранулы из косметики и средств личной гигиены, а также микроволокна, отрывающиеся от синтетической одежды при стирке;

- с промышленными сбросами производств, использующих пластмассы в качестве сырья или выпускающих пластиковые изделия;

– при ведении сельскохозяйственной деятельности, где часто применяется полимерная пленка для мульчирования. Микропластик также может содержаться в удобрениях, полученных из переработанных органических отходов;

– от транспорта, в особенности по причине истирания автомобильных шин. За 100 километров езды на автомобиле с шин стирается примерно 20 граммов полимерной пыли [7];

– через полигоны и свалки отходов, на которых выброшенные пластмассовые изделия медленно распадаются на микропластик под воздействием природных факторов.

– за счет атмосферного переноса.

Загрязнение окружающей среды, охватывающее всю биосферу – от глубин океана до стратосферы – крайне широкая тематика и сложный, многогранный вызов современности. Неуклонно наращая антропогенное давление на природные системы, мы, по сути, экспериментируем с хрупким равновесием, обеспечивающим существование жизни на Земле. Нарушение равновесия влечет за собой каскад последствий, масштаб и долгосрочность которых только предстоит осознать в полной мере.

1.5. Антропогенное воздействие на окружающую среду

На сегодняшний день состояние биосферы характеризуется беспрецедентным по масштабам антропогенным давлением, которое по своей силе сопоставимо с глобальными геологическими процессами. Хозяйственная деятельность человека, направленная на извлечение и переработку природных ресурсов, неизбежно ведет к системной трансформации окружающей среды, изменяя структуру и функции естественных экосистем. Антропогенная трансформация планеты приобрела системный характер, затрагивая все геосферные оболочки.

В 2009 году группа международных ученых под руководством Йохана Рокстрёма (Стокгольмский центр устойчивости) сформулировала концепцию планетарных границ. Её основная идея заключается в том, что на протяжении последних 10–12 тысяч лет Земля находилась в состоянии относительной стабильности (эпоха голоцена), что позволило человечеству развить сельское хозяйство и построить цивилизацию. Однако человеческая деятельность стала глобальной силой, способной вывести планету из этого равновесия.

Планетарные границы – это критические пороги устойчивости глобальных систем жизнеобеспечения, превышение которых ведет к запуску необратимых нелинейных процессов, ставящих под угрозу гомеостаз всей биосферы.

Ученые выделили девять ключевых процессов-границ (таблица 3), определяющих устойчивость биосферы. Для каждого процесса

Таблица 3 – Планетарные границы (отчет Planetary Health Check 2025).

Граница	Показатель	Статус
Изменение климата	Концентрация углекислого газа в атмосфере. Безопасный уровень CO ₂ : 350 ppm. Безопасное возрастание радиоактивного воздействия: +1 Вт/м ²	Есть превышение Уровень CO ₂ : 423 ppm Возрастание радиоактивного воздействия: + 2,97 Вт/м ²
Убывание биоразнообразия	Коэффициент вымирания (количество вымерших видов на миллион в год). Безопасный уровень: 10	Есть превышение 100-1000
Биогеохимические изменения	Количество антропогенного азота, удаляемого из атмосферы (миллионы тонн в год) и антропогенного фосфора, поступающего в океаны (миллионы тонн в год). Безопасные уровни: N ₂ : 62 Мт/год P: 6,2 Мт/год	Есть превышение N ₂ : 82 Мт/год P: 11,2 Мт/год
Закисление океана	Глобальное среднее насыщенное состояние арагонита в поверхностной морской воде. Безопасный уровень: 2,86 Ω _{arag}	Спорные данные (согласно официальной границе – превышения нет 2,84 Ω _{arag} , однако в работе [8] это оспаривается).
Изменение системы землепользования	Поверхность земли, не используемая под пахотные земли (в процентах). Безопасный уровень: 75%	Есть превышение 59%
Изменение пресноводного цикла	Процент земель, где оказывается антропогенное воздействие на речные стоки. Безопасный уровень (по «голубой» воде): 12,9%	Есть превышение 22,6%
Химическое загрязнение/новые вещества	Доля синтетических химических веществ, выпущенных на рынок без надлежащей проверки безопасности. Безопасный уровень: 0%	Есть превышение Точные показатели не предоставлены
Истощение озонового слоя	Концентрация стратосферного озона (единицы Добсона, DU). Безопасный уровень: не менее 277 DU	Нет превышения 285,7 DU
Атмосферное аэрозольное загрязнение	Общая концентрация твердых частиц в атмосфере на региональной основе (измеряется в межполушарной разнице в аэрозольной оптической толщине (AOD)). Безопасный уровень: 0,1 ΔAOD	Нет превышения 0,063 ΔAOD

установлена «безопасная рабочая зона» (зеленая зона). Выход за её пределы в зону неопределенности (желтая) или высокого риска (красная) означает, что системы жизнеобеспечения планеты могут начать работать непредсказуемо.

При этом ни одна из этих границ не существует изолированно. Например, изменения в землепользовании могут влиять на биоразнообразие, а увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере, помимо прочего, влияет на закисление океана.

Рассмотрим некоторые важные последствия антропогенного воздействия на различные физические оболочки Земли подробнее.

Атмосфера и климатические изменения

Атмосфера Земли является наиболее динамичной и уязвимой оболочкой планеты, выполняющей функции глобального буфера и транспортного канала для загрязняющих веществ. Антропогенное воздействие на атмосферу не ограничивается выбросами парниковых газов, оно включает в себя фундаментальную перестройку химических процессов, влияющих на здоровье биоты и сохранность защитного экрана Земли.

Хозяйственная деятельность привела к насыщению атмосферы компонентами, не свойственными её естественному составу:

– Тропосферный озон, который, в отличие от полезного стратосферного озона, образуется у поверхности Земли в результате реакций оксидов азота (NO_x) и летучих органических соединений под действием солнечного света и является мощным токсикантом – подавляет фотосинтез растений, разрушает легочные ткани и выступает сильным окислителем, повреждающим материалы и оборудование.

– Аэрозольное загрязнение (частицы $\text{PM}_{2.5}$ и PM_{10}) – это мелкодисперсные твердые частицы размерами до 2,5 и 10 мкм соответственно, которые создают в атмосфере устойчивую взвесь. Они не только снижают прозрачность воздуха и влияют на здоровье человека, но и служат ядрами конденсации для токсичных соединений. Способны перемещаться на тысячи километров, выпадая в арктических зонах и ускоряя таяние снега за счет изменения поглощения света.

– Формирование кислотных осадков, обусловленных эмиссией диоксида серы (SO_2) и оксидов азота промышленными предприятиями и транспортом, что приводит к образованию в атмосфере слабых растворов серной и азотной кислот. Выпадение «кислотных дождей» вызывает закисление почв и водоемов, что ведет к вымыванию жизненно важных элементов и мобилизации токсичных тяжелых металлов. Это провоцирует массовую гибель лесов («усыхание»), деградацию пресноводных экосистем и коррозию архитектурного наследия человечества.

– Антропогенные эмиссии галогенированных соединений, которые провоцируют истончение озонового слоя Земли. Благодаря Монреальскому протоколу (1987 г.) и отказу от производства хлорфторуглеродов разрушение озонового слоя замедлилось, и ученые фиксируют признаки его постепенного восстановления. Прогнозируется, что над большей частью планеты он может вернуться к состоянию 1980 года к середине XXI века.

– Изменение концентрации газов (таблица 4), обладающих способностью поглощать тепловое (инфракрасное) излучение Земли. Эти газы получили название парниковых, и их накопление в атмосфере радикально меняет её физико-химические свойства и способствует изменению климата. Накопление парниковых газов также меняет оптическую плотность атмосферы в инфракрасном диапазоне. Атмосфера

Таблица 4 – Парниковые газы

Газ	Описание
Диоксид углерода (CO ₂)	Основной продукт сжигания ископаемого топлива (угля, нефти, газа), производства цемента и сведения лесов. Обладает высокой химической устойчивостью и может сохраняться в атмосфере на протяжении столетий.
Метан (CH ₄)	Поступает в атмосферу в результате добычи и транспортировки природного газа, животноводства (кишечная ферментация скота), выращивания риса и разложения отходов на свалках. Метан значительно мощнее CO ₂ по способности удерживать тепло, однако он имеет меньший срок жизни в атмосфере – около 12 лет.
Закись азота (N ₂ O)	Основной источник — сельское хозяйство (избыточное внесение азотных удобрений) и химическая промышленность. Это соединение не только способствует удержанию тепла, но и является одним из главных разрушителей озонового слоя в XXI веке. Мощный, долгоживущий парниковый газ, занимающий третье место по влиянию на глобальное потепление. Его потенциал потепления примерно в 270 раз выше, чем у углекислого газа, а время жизни в атмосфере составляет около 120 лет.
Фторсодержащие газы – гидрофторуглероды, перфторуглероды и гексафторид серы	Группа чисто антропогенных веществ, используемых в холодильном оборудовании, кондиционировании и электротехнике. Несмотря на относительно малые объемы выбросов, их потенциал удержания тепла в тысячи и десятки тысяч раз выше, чем у диоксида углерода, а срок жизни в атмосфере может составлять тысячи лет.
Водяной пар	Самый распространенный и мощный естественный парниковый газ, ответственный за 36–70% парникового эффекта Земли. Его концентрация регулируется температурой, создавая положительную обратную связь: потепление усиливает испарение, увеличивая количество пара и вызывая дальнейший рост температуры.

становится менее «прозрачной» для теплового излучения, уходящего от поверхности Земли в космос. Мы наблюдаем изменение фундаментального параметра – радиационного баланса планеты, где приток энергии от Солнца остается прежним, а её отвод затрудняется из-за измененного газового состава. Ключевая проблема парниковых газов – их персистентность (устойчивость).

Увеличение концентраций парниковых газов ведет к парниковому эффекту.

Парниковый эффект – это повышение температуры атмосферы Земли из-за удержания тепла парниковыми газами.

Принцип действия парникового эффекта основан на селективной прозрачности атмосферы. Коротковолновое солнечное излучение беспрепятственно проходит сквозь газовую оболочку и нагревает поверхность Земли. Нагретая поверхность, в свою очередь, становится источником длинноволнового (теплового) излучения. В естественных условиях часть этого тепла уходит в космос, однако парниковые газы задерживают его, переизлучая обратно к поверхности. Ключевым фактором, определяющим, сколько солнечной энергии поглотит планета, является альbedo – коэффициент отражательной способности поверхности. Здесь работает механизм положительной обратной связи: парниковый эффект вызывает потепление, которое приводит к сокращению площади ледников и снежного покрова. Массовое таяние полярных льдов (криосферы) обнажает темные воды океана и подстилающие породы, которые поглощают солнечную энергию вместо того, чтобы отражать её.

Литосфера

Одним из основных последствий антропогенеза является *трансформация ландшафтов*. Использование земной поверхности в ходе урбанизации, горнодобывающей деятельности и гидротехнического строительства приводит к фрагментации местообитаний и нарушению естественных биогеохимических циклов. Процесс «окультуривания» земель сопровождается упрощением видовой структуры сообществ, что снижает их экологическую устойчивость.

Особую тревогу вызывает *деградация почвенного покрова* — фундаментального ресурса биосферы. Интенсивное сельское хозяйство, сопровождающееся избыточным применением агрохимикатов и нарушением севооборотов, инициирует процессы *эрозии, засоления и дегумификации* почв.

В засушливых регионах эти процессы перерастают в *опустынивание (аридизацию)* – необратимое разрушение биологического потенциала земель, охватывающее ежегодно миллионы гектаров. Опустынивание является не только экологической, но и гуманитарной катастрофой,

ведущей к потере продовольственной безопасности и возникновению климатической миграции.

На другом полюсе стоят ошибки в гидромелиорации. Интенсивное орошение без адекватного дренажа вызывает подъем грунтовых вод, провоцируя *заболачивание*. В засушливых зонах это неизбежно ведет к выносу глубоких солей в корнеобитаемый слой — вторичному засолению, которое делает почву биологически мертвой и непригодной для флоры.

Обладая высокой сорбционной способностью, почва аккумулирует техногенные загрязнения, предотвращая их прямое попадание в грунтовые воды. Промышленное производство, горнодобывающая отрасль и транспорт являются основными источниками поступления в почву *тяжелых металлов* (свинец, ртуть, кадмий, мышьяк, медь, цинк). При достижении критических концентраций металлы становятся токсичными для почвенной микрофлоры и беспозвоночных (например, дождевых червей), что останавливает процессы естественного почвообразования. Через корневые системы растений металлы включаются в трофические цепи, попадая в организм человека и вызывая системные поражения здоровья.

Интенсивное сельское хозяйство и химическая промышленность привели к накоплению в литосфере *стойких органических загрязнителей и пестицидов* (ДДТ, диоксины, полихлорбифенилы). Стойкие органические загрязнители обладают исключительной персистентностью – они могут сохраняться в почве десятилетиями, не теряя токсичности, и нарушают гормональный и репродуктивный циклы живых организмов. Являясь липофильными (растворимыми в жирах), они аккумулируются в биомассе, увеличивая свою концентрацию на каждом последующем уровне пищевой цепи.

Места захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов становятся центрами формирования техногенных геохимических аномалий. Дождевые воды, проходя сквозь тело свалки, насыщаются сложным коктейлем из продуктов разложения, органических кислот и растворенных солей. *Свалочный фильтрат* проникает в глубокие слои литосферы и вызывает необратимое химическое загрязнение подземных водоносных горизонтов.

Химическое воздействие на литосферу проявляется и в *изменении кислотно-щелочного баланса* почв. Выпадение кислотных дождей и избыточное внесение физиологически кислых минеральных удобрений приводят к закислению почв. Закисление ведет к вымыванию жизненно важных элементов (кальция, магния, калия) и высвобождению подвижных форм алюминия, который крайне токсичен для корней растений.

Гидросфера

Антропогенная деятельность радикально изменила циклы азота и фосфора, вызвала изменение климата, что стало причиной глобальной трансформации водных ресурсов.

Повышение уровня Мирового океана

Помимо таяния материковых ледников, значительный вклад в подъем уровня воды вносит термическое расширение океана – вода при нагревании увеличивается в объеме. Это создает угрозу затопления густонаселенных прибрежных территорий и засоления пресноводных горизонтов.

Трансформация гидрологического цикла

Повышение температуры интенсифицирует испарение воды. Это ведет к перераспределению осадков: в одних регионах это вызывает катастрофические наводнения, в других – затяжные засухи.

Химическое загрязнение и эвтрофикация водоемов

Массовый смыв азотных и фосфорных удобрений с полей, а также сброс неочищенных хозяйственно-бытовых стоков приводят к «цветению» воды. Бурное размножение водорослей расходует растворенный в воде кислород, что вызывает массовые заморы рыбы и превращение живых экосистем в анаэробные «мертвые зоны».

Сбросы промышленных предприятий насыщают воду тяжелыми металлами, нефтепродуктами и синтетическими ядами. Многие из этих веществ обладают способностью к биоаккумуляции: их концентрация в тканях рыб и морских млекопитающих может быть в тысячи раз выше, чем в самой воде, что делает водные ресурсы источником опасности для всей пищевой цепи.

Закисление океана

Мировой океан является главным поглотителем антропогенного углекислого газа. Однако этот процесс имеет критическое побочное действие — закисление. Избыток атмосферного CO₂ растворяется в океане и повышает его кислотность. Это угрожает существованию организмов с карбонатным скелетом (кораллы, моллюски), подрывая фундамент океанических пищевых цепей. Разрушение коралловых рифов, к примеру, ведет к уменьшению биоразнообразия и подрыву устойчивости всей морской экосистемы.

Пластиковое и микропластиковое загрязнение

Гидросфера стала финальным резервуаром для накопления полимерных отходов. Крупный пластиковый мусор становится причиной гибели морских животных, но более опасен микропластик (частицы менее 5 мм). Микрочастицы пластика могут выступать адсорбентом для стойких органических загрязнителей (полихлорированные бифенилы/полициклические ароматические углеводороды/хлорорганические пестициды и др.). Попадая в организмы зоопланктона и далее по пищевой

цепи, пластик становится потенциальным проводником токсинов в биологические ткани, включая организм человека.

Тепловое загрязнение

Использование воды для охлаждения на ТЭС и АЭС приводит к возврату в водоемы подогретых вод. Повышение температуры воды снижает растворимость кислорода и ускоряет метаболизм микроорганизмов, что нарушает естественный баланс и способствует вытеснению холодолюбивых видов теплолюбивыми (часто инвазивными).

Изъятие пресной воды

Чрезмерное изъятие пресной воды для нужд промышленности и ирригации ведет к деградации речных систем и истощению подземных водоносных горизонтов. Восстановление запасов подземных вод происходит крайне медленно, что превращает пресную воду в исчерпаемый и дефицитный ресурс.

Положительное влияние человека

Несмотря на доминирование деструктивных трендов, современная наука и осознанное управление ресурсами позволяют человеку выступать в роли активного восстановителя биосферных функций. Переход от стихийной эксплуатации к управляемой коэволюции общества и природы открывает возможности для минимизации ущерба и восстановления стабильности геосферных оболочек.

Успешный опыт международного сотрудничества доказал возможность исправления ошибок. Реализация Монреальского протокола стала первым в истории примером успешного исцеления атмосферы. Отказ от озоноразрушающих веществ позволил запустить естественные процессы восстановления озонового слоя, защищающего жизнь от мутагенного УФ-излучения. Масштабные проекты по восстановлению лесов и созданию защитных лесополос способствуют активному изъятию избыточного CO₂ из атмосферы. Внедрение технологий «зеленой химии» и переход на безуглеродные источники энергии позволяют снижать химическую нагрузку на атмосферу.

Положительное антропогенное воздействие на литосферу выражается в активном восстановлении нарушенных земель и формировании высокопродуктивных ландшафтов. Современные технологии позволяют возвращать в хозяйственный и природный оборот земли, разрушенные горными работами или промышленным загрязнением. Создание искусственных почв, использование сидератов и микробиологическая очистка грунтов превращают бывшие промышленные зоны в парки и агрогодья. Переход к технологиям сберегающего и точного земледелия предотвращает эрозию и способствует накоплению гумуса.

Положительное влияние на гидросферу реализуется через внедрение принципов замкнутого цикла и восстановление самоочищающей способности водоемов. Переход промышленных предприятий на замкнутые циклы водоснабжения полностью исключает сброс загрязненных стоков в природные объекты. Современные многоступенчатые системы очистки позволяют возвращать в реки воду, качество которой часто превосходит фоновые показатели. Проекты по расчистке русел рек, восстановлению водно-болотных угодий и созданию морских охраняемых зон способствуют восстановлению гидрологического режима и биологической продуктивности акваторий.

Человек сегодня обладает инструментами для предотвращения исчезновения видов и активного восстановления биологических сообществ. Создание заповедников и национальных парков позволяет сохранять островки дикой природы, которые служат донорами биоразнообразия для прилегающих территорий, а программы по разведению редких видов в неволе с последующим возвращением в дикую природу (например, восстановление популяций зубра, переднеазиатского леопарда) позволяют восстанавливать утраченные звенья экосистем. Генетические банки данных обеспечивают сохранность генофонда планеты для будущих поколений.

1.6. Использование природных ресурсов

Природные ресурсы представляют собой совокупность объектов и явлений живой и неживой природы, которые на данном этапе развития производительных сил используются или могут быть использованы для удовлетворения материальных и духовных потребностей общества. В контексте осознанного потребления ресурсов важно понимать их природу и динамику восполнения, так как это определяет стратегию их рационального использования.

Наиболее фундаментальной и общепринятой является экологическая классификация (таблица 5), базирующаяся на признаке исчерпаемости ресурсов в масштабах человеческой истории.

Одними из наиболее важных для жизни людей являются минеральное и биологическое (растительное и фаунистическое) сырье.

Минеральное сырье — это добытые из недр полезные ископаемые (горные породы, руды, минералы), которые прошли первичную обработку и используются в промышленности для производства материалов, топлива, энергии или химической продукции.

Таблица 5 – Экологическая классификация природных ресурсов

Название	Описание	Ресурсы
Неисчерпаемые ресурсы	К этой группе относятся ресурсы, использование которых не приводит к видимому уменьшению их запасов в планетарном масштабе. Это ресурсы «потока», обусловленные фундаментальными физическими процессами в Солнечной системе и недрах Земли. Осознанный подход к неисчерпаемым ресурсам заключается в приоритетном развитии технологий их эффективного захвата и преобразования как экологически чистой альтернативы ископаемому топливу.	Энергия солнечного излучения, энергия ветра, морских приливов и отливов. Общий объем воды в гидросфере (однако важно различать общие водные запасы и дефицитные ресурсы пресной воды). Геотермальная энергия недр
Исчерпаемые ресурсы	<i>Невозобновляемые ресурсы</i> Это ресурсы, циклы накопления которых занимают миллионы лет и происходят в специфических геологических условиях. В антропогенном масштабе времени их запасы конечны и не восполняются.	Все виды полезных ископаемых: топливно-энергетическое сырье (нефть, газ, уголь, уран) и минеральные рудные и нерудные ископаемые.
	<i>Возобновляемые ресурсы</i> Ресурсы, способные к самовоспроизводству за счет биологических процессов или физико-химических циклов биосферы. Остаются возобновляемыми только до тех пор, пока скорость их потребления человеком не превышает темпы их естественного прироста или очищения.	Биологические ресурсы (флора, фауна, грибы), а также ресурсы чистого атмосферного воздуха и пресной воды.
	<i>Относительно возобновляемые</i> Медленно возобновляемые ресурсы	Почвенное плодородие (образование 1 см плодородного слоя занимает столетия)

По использованию минерального сырья в сфере производства и потребления выделяется девять групп:

- 1) жидкое и газообразное топливно-энергетическое и химическое сырье (нефть, природный газ, газовый конденсат, попутный газ);
- 2) твердое топливно-энергетическое и химическое сырье (уран, уголь, сланцы, торф);
- 3) металлы (черные, цветные, благородные, редкие, рассеянные и радиоактивные);
- 4) нерудное сырье для металлургии;

- 5) техническое сырье, драгоценные, полудрагоценные и поделочные камни;
- 6) сырье для строительной индустрии,
- 7) горно-химическое и агрономическое сырье;
- 8) воды (подземные и поверхностные, минеральные грязи и илы);
- 9) инертные газы (гелий, неон, аргон).

Биологические ресурсы (биоресурсы) – это совокупность всех живых организмов (растений, животных, грибов, микроорганизмов), составляющих основу биосферы, которые используются или могут быть использованы человеком для удовлетворения потребностей.

Среди биоресурсов для удовлетворения нужд широко и повсеместно используется *растительное сырье* – это продукты, получаемые из океанических ресурсов и из дикорастущих или культивируемых растений (цельные растения, их части: корни, листья, плоды, семена, кора), используемые в свежем или высушенном виде.

Эффективность использования природного сырья напрямую зависит от специфики эксплуатации различных категорий ресурсов. Главной причиной истощения природных ресурсов является господствующая на протяжении последних столетий модель линейной экономики, функционирующая по принципу «взять – произвести – выбросить». За последние 50 лет мировое потребление материалов утроилось, и, согласно прогнозам ООН, при сохранении текущих трендов к 2060 году оно может удвоиться относительно сегодняшнего уровня, что неизбежно приведет к коллапсу.

Оценка сроков истощаемости ресурсов является сложной прогностической задачей, зависящей от объема разведанных запасов и динамики их потребления.

Фундаментальный анализ ресурсных ограничений был заложен еще в 1972 году в докладе Римскому клубу «Пределы роста» группой ученых под руководством Денниса Медоуза. На основе компьютерного моделирования было показано, что при сохранении существующих темпов индустриализации и потребления цивилизация неизбежно выйдет за пределы емкости среды — способности планеты обеспечивать ресурсы и ассимилировать отходы. Развитие ситуации в последующие десятилетия подтвердило наиболее пессимистичные сценарии: вместо корректировки стратегии развития мировое сообщество перешло к еще более интенсивному изъятию сырья и загрязнению атмосферы. В 1994 году в работе «За пределами роста» авторы констатировали, что человечество перешло в состояние экологического «овершута» – ситуации, при которой антропогенная нагрузка превысила восстановительный потенциал природы. С начала 1990-х годов мировая экономика функционирует в режиме «экологического долга», потребляя возобновляемые ресурсы

(пресную воду, лес, биоресурсы океана) быстрее, чем они успевают регенерировать.

Согласно уточненным прогнозным моделям, наиболее критическая фаза системного кризиса может ожидаться в период между 2030 и 2050 годами. Среди наиболее вероятных последствий выделяются:

- критическое истощение запасов морепродуктов из-за перевылова и изменения химизма океана;
- потеря биоразнообразия и нарушение глобального цикла углерода;
- полная деградация кораллов под воздействием потепления и закисления вод, что сопоставимо по масштабу с уничтожением тропических лесов.

По данным Planetary Project в течение XX столетия из недр Земли было извлечено полезных ископаемых больше, чем за всю историю цивилизации. Так, например, потребление ископаемого топлива возросло почти в 30 раз, поскольку объем мирового промышленного производства вырос в 50 раз. Причем 3/4 роста потребления топлива и 4/5 увеличения объема промышленного производства произошло за период с начала 1950-х годов. При текущих объемах доказанных запасов и объемах добычи человечеству хватит нефти на срок от 50 до 54 лет, а природного газа – на срок от 55 до 60 лет.

Вопрос об исчерпаемости металлов – это не столько история о том, что они закончатся завтра, сколько о рентабельности, технологиях и энергозатратах. В недрах Земли содержится огромное количество металлов, но легкодоступные месторождения действительно истощаются. В частности, прогнозы говорят, что при текущих темпах добычи меди легкодоступных запасов хватит на 25–30 лет. Дефицита физического металла не будет, но цена на него будет расти из-за необходимости переработки бедных руд. Лития, необходимого для аккумуляторов, на планете много, но мощностей по его извлечению не хватает. Кобальт – более проблемный ресурс, так как 70% его добычи сосредоточено в одной стране (Демократической Республике Конго) и прогнозируется дефицит к 2030 году.

Угроза ресурсного коллапса требует коренной смены парадигмы взаимодействия человека и природы. Если на индустриальном этапе развитие понималось как максимально эффективная эксплуатация ресурсов, то в XXI веке во главу угла встает концепция рационального природопользования – научно обоснованного управления, направленного на сохранение ресурсного потенциала планеты при обеспечении высокого качества жизни.

Рациональное природопользование – это система эффективного и бережного использования природных ресурсов, направленная на удовлетворение нужд человека при сохранении способности природы к

самовосстановлению, минимизации отходов и вредного воздействия, что обеспечивает устойчивое развитие общества и экосистем.

Переход к рациональному природопользованию реализуется через внедрение конкретных технологических и организационных принципов (Рис. 11).



Рисунок 11 – Принципы перехода к рациональному природопользованию

Минеральное сырье в природе практически никогда не бывает монокомпонентным. Рациональный подход подразумевает извлечение всех полезных элементов из добытой руды (например, попутное извлечение редких металлов при добыче меди), а также использование отходов производства в качестве вторичного ресурса для других отраслей, то есть *комплексное использование сырья*.

Энергоэффективность является приоритетным направлением, потому как снижение удельных энергозатрат на единицу продукции позволяет напрямую сократить потребность в добыче ископаемого топлива и снизить тепловую и химическую нагрузку на атмосферу.

Важной составляющей является внедрение технологий *рециклинга и рекуперации*.

Рециклинг — это обработка и дальнейшее использование уже бывших в употреблении материалов [9].

Рекуперация — улавливание и возврат части энергии или вещества для повторного использования [10]. Например, использование тепла

отходящих газов для обогрева помещений или конденсация паров растворителей в химической промышленности.

Осознание неизбежности ресурсных ограничений и рисков, описанных в модели «пределов роста», привело к формированию комплекса стратегий, направленных на предотвращение глобального коллапса. Решение ресурсного кризиса сегодня рассматривается не как полный отказ от потребления, а как радикальная технологическая и концептуальная перестройка науки, промышленности и экономики.

К примеру, проблема истощения невозобновляемых углеводородных ресурсов и накопление пластиковых отходов в биосфере привели к необходимости создания замещающих материалов. Традиционные синтетические пластики (полиэтилен, полипропилен и др.), обладая выдающимися эксплуатационными свойствами, имеют фундаментальный экологический недостаток: несоответствие между коротким жизненным циклом изделия (например, упаковки) и сверхдолгим периодом его деструкции (до 400–500 лет). Решением этой проблемы стало развитие индустрии *биоразлагаемых пластмасс*.

Биоразлагаемые пластмассы – это полимерные материалы, способные распадаться под действием микроорганизмов на простые природные соединения, такие как вода, углекислый газ, метан, неорганические вещества, и биомассу.

Спектр наиболее востребованных в современной промышленности биоразлагаемых полимеров включает *полилактиды* (ПЛА), *полигидроксиалканоаты* (ПГА), композиты на основе *крахмала и целлюлозы*, а также *поливиниловый спирт* (ПВС). Ключевые области их эксплуатации сосредоточены в производстве пищевой и транспортной упаковки, агротехнологиях (в частности, для изготовления биodeградируемых мульчирующих пленок) и высокотехнологичной медицине (создание биорезорбируемых шовных материалов и имплантатов).

Хотя биodeградация некоторых материалов возможна в почве и водной среде, для большинства биоразлагаемых пластмасс необходимы строго определённые условия (определённая температура, влажность и доступ кислорода), которые обеспечиваются преимущественно в условиях промышленного компостирования. Поэтому важно учитывать, что, если биоразлагаемая пластмасса попадает в среду, для которой она не предназначена (например, компостируемый в промышленности пластик попадает в холодный океан), он начинает медленно фрагментироваться, но полной биodeградации не произойдет.

Несмотря на устойчивый рост отрасли, начавшийся в 2000-х годах, рыночная доля биоразлагаемых материалов остается незначительной в масштабах глобального производства. Так, по состоянию на 2024 год, мировой выпуск биопластиков составил немногим более 1 млн тонн. Для

сравнения: суммарный объем производства всех видов пластмасс в этот же период превысил 414 млн тонн. Столь существенный разрыв подчеркивает статус биоразлагаемых пластмасс как инновационного, но пока еще нишевого решения, требующего дальнейшего технологического развития и системной государственной поддержки для масштабирования в рамках экономики замкнутого цикла.

1.7. Обеспечение экологической безопасности

Экологическая безопасность является неотъемлемой частью национальной безопасности и базовым условием реализации стратегии устойчивого развития.

Экологическая безопасность – это состояние защищенности биосферы и человеческого общества от угроз, возникающих в результате антропогенных и природных воздействий на окружающую среду [12].

В отличие от охраны окружающей среды, которая фокусируется на сохранении природы как таковой, экологическая безопасность рассматривает систему «человек – общество – природа» как единый объект защиты. Она подразумевает поддержание такого качества среды, при котором обеспечивается устойчивое функционирование экосистем и исключается недопустимый риск для здоровья населения. Для этого необходима *система экологической безопасности* – механизм, обеспечивающий допустимое негативное воздействие природных и антропогенных факторов экологической опасности на окружающую среду и самого человека [12].

Эффективное управление экологическими рисками базируется на ряде основополагающих принципов:

- приоритет охраны жизни и здоровья человека;
- превентивность (принцип предосторожности);
- платность природопользования;
- научная обоснованность;
- экономическая ответственность;
- оценка и контроль рисков;
- гласность и участие общественности;
- комплексность.

Для контроля состояния среды и ограничения антропогенного воздействия функционирует система нормативов.

Экологическое нормирование – это нахождение граничных значений экологических нагрузок для того, чтобы можно было установить ограничения для управляющих воздействий на объект нормирования и достигнуть целей нормирования [13].

Правовой фундамент обеспечения экологической безопасности в Российской Федерации базируется на иерархической системе нормативных

актов, высшее место в которой занимает Конституция РФ. Центральное значение имеет статья 42, закрепляющая «экологическую триаду» прав гражданина: право на благоприятную окружающую среду, доступ к достоверной информации о её состоянии и право на возмещение ущерба, причиненного здоровью или имуществу вследствие экологических правонарушений. Кроме того, статьи 9, 36, 58 и другие определяют основы рационального использования земель и устанавливают обязанность каждого сохранять природу и бережно относиться к её богатствам.

Ключевым инструментом реализации конституционных норм является федеральное законодательство. Основным системообразующим актом в данной сфере выступает Федеральный закон № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. [14]. Он регулирует отношения в области взаимодействия общества и природы, устанавливает принципы природопользования и является правовым базисом для всей системы экологического нормирования, экспертизы и контроля в стране.

Выделяют две основные группы нормативов:

1) Нормативы качества окружающей среды:

– ПДК (предельно допустимая концентрация) – это максимальное количество загрязняющего вещества в воде, воздухе или почве, которое при постоянном воздействии не оказывает влияния на здоровье человека и его потомство;

– ОДК (ориентировочно допустимая концентрация) – это временный гигиенический норматив, определяющий максимальное допустимое количество химического вещества в почве, безопасное для человека и окружающей среды. Он используется, когда нет данных для установления ПДК;

– ОБУВ (ориентировочный безопасный уровень воздействия) — это временный расчетный гигиенический норматив, определяющий максимально допустимое содержание загрязняющих веществ в воздухе (атмосферном или рабочей зоны);

– комплексные: потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА), суммарный показатель загрязнения Z_c , лимитирующий показатель вредности (ЛПВ);

– ПДУ (предельно допустимый уровень) – нормативы для физических воздействий (шум, вибрация, радиация, электромагнитные поля);

– биологические показатели состояния окружающей среды (например, количество особей на единицу объема).

2) Нормативы допустимого воздействия (от источника):

– ПДВ (предельно допустимый выброс) – лимит для загрязнения атмосферы конкретным предприятием.

– ПДС (предельно допустимый сброс) – лимит для загрязнения водных объектов.

– нормативы образования отходов – лимит для общего количества накапливаемых предприятием отходов за определенный период.

Для оценки качества атмосферного воздуха установлены две основные категории ПДК, направленные на защиту здоровья населения – максимально разовые ПДК_{м.р.} (для предотвращения рефлекторных реакций) и среднесуточные ПДК_{с.с.} (для предупреждения хронических заболеваний).

Для загрязняющих веществ устанавливаются 4 класса опасности (на основании ГОСТ 12.1.007-76 [15], определяющие степень их воздействия на организм человека и окружающую среду:

- 1 класс (чрезвычайно опасные)
- 2 класс (высокоопасные)
- 3 класс (умеренно опасные)
- 4 класс (малоопасные)

Для отходов производства и потребления установлена отдельная классификация из 5 классов опасности, в основу которой заложен период восстановления окружающей среды после загрязнения.

Обеспечение экологической безопасности — это комплекс правовых, организационных, технических и экономических мер, направленных на защиту окружающей среды и человека от негативного воздействия хозяйственной деятельности, а также природных и техногенных чрезвычайных ситуаций.

Можно выделить основные меры по обеспечению экологической безопасности:

1) государственное регулирование (разработка экологических стандартов, нормирование в отношении новых загрязнителей, проведение экспертиз, мониторинг окружающей среды и лицензирование деятельности, контроль и надзор);

2) производственная безопасность (установка очистных сооружений, использование наилучших доступных технологий, переработка отходов, переход на альтернативные источники энергии и др.);

3) соблюдение природоохранного законодательства, ответственность за нарушение норм (штрафы);

4) экологическое просвещение;

5) действия по сохранению лесов, водных объектов, недр и биологического разнообразия.

Также обеспечение экологической безопасности невозможно без эффективных механизмов превентивного и текущего контроля, среди наиболее важных из которых можно выделить следующие:

1) *Экологическая экспертиза* – это обязательная проверка проектной документации перед началом хозяйственной деятельности на соответствие требованиям охраны окружающей среды. Она проводится Росприроднадзором (федеральный/региональный уровень) на основании

Федерального закона № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе» [16]. Основная цель — предотвратить негативное воздействие на природу до начала строительства, реконструкции или эксплуатации.

2) *Экологический аудит* – это независимая оценка соответствия хозяйственной деятельности предприятия требованиям природоохранного законодательства, регулируемая ФЗ №7 «Об охране окружающей среды». Он направлен на минимизацию экологических рисков, штрафов, снижение воздействия на среду и часто проводится перед сертификацией ISO 14001.

3) *Оценка воздействия на окружающую среду* – термин Международной ассоциации по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС, IAIA, International Association for Impact Assessment). Предназначена для выявления характера, интенсивности и степени опасности влияния любого вида планируемой хозяйственной деятельности на состояние окружающей среды и здоровье населения. Проведение ОВОС в РФ предусмотрено ст. 32 Федерального Закона «Об охране окружающей среды» №7-ФЗ.

4) *Экологический мониторинг* – это комплексная система регулярных наблюдений за состоянием окружающей среды (воздуха, воды, почв, лесов), оценки и прогноза ее изменений под влиянием природных и антропогенных факторов. Основная цель – получение актуальной информации для охраны природы, управления природопользованием и предотвращения экологических рисков.

5) *Производственный экологический контроль* – это система внутренних мер, реализуемая юридическими лицами и ИП (для объектов I-III категорий) для обеспечения соблюдения требований охраны окружающей среды, рационального природопользования и предотвращения нарушений законодательства. Включает в себя мониторинг выбросов, сбросов, отходов, а также ведение соответствующей документации.

6) *Экологическая сертификация* – это добровольная процедура подтверждения соответствия продукции, услуг или производственных процессов экологическим стандартам безопасности. Осуществляется в соответствии с положениями статьи 21 Федерального закона «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 года [17].

Нормирование устанавливает границы допустимого, а интеграция указанных механизмов контроля обеспечивает многоуровневую систему защиты биосферы.

1.8. Экологический мониторинг

Для эффективного управления ресурсами и обеспечения экологической безопасности необходима система непрерывного слежения за состоянием окружающей среды.

Само понятие «мониторинг» (от лат. *monitor* – напоминающий, надзирающий) вошло в научный оборот в 1972 году на Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде. Основоположником концепции считается английский ученый Р. Манн, который предложил использовать мониторинг для слежения за глобальными изменениями биосферы. В СССР теоретические основы мониторинга были разработаны академиком Ю.А. Израэлем, который дополнил систему не только наблюдениями, но и элементами оценки и прогноза антропогенных изменений.

Экологический мониторинг – это комплексная система долгосрочных наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений её состояния под влиянием антропогенных и природных факторов [18].

Объектами мониторинга являются атмосферный воздух, водные объекты, почвы, недра, растительный и животный мир, а также источники техногенного воздействия.

В Российской Федерации единая система государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды) создана в целях обеспечения охраны окружающей среды, и ее задачами являются:

- регулярные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, изменениями состояния окружающей среды;

- хранение, обработка (обобщение, систематизация) информации о состоянии окружающей среды;

- анализ полученной информации в целях своевременного выявления изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и (или) антропогенных факторов, оценка и прогноз этих изменений;

- обеспечение органов государственной власти, органов местного самоуправления, юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, граждан информацией о состоянии окружающей среды.

Для координации усилий на разных уровнях созданы:

- 1) ГСМОС (Глобальная система мониторинга окружающей среды). Создана под эгидой ЮНЕП (ООН). Координирует наблюдения за климатом, переносом загрязнений через границы и состоянием океана.

- 2) ЕГСЭМ (Единая государственная система экологического мониторинга). В Российской Федерации это межведомственная система, объединяющая данные Росгидромета, Росприроднадзора, Рослесхоза и других ведомств. Она обеспечивает государственную власть и граждан достоверными данными о состоянии окружающей среды в стране.

Системы мониторинга классифицируются по пространственному признаку, объектам наблюдения, природным компонентам и организационным особенностям (таблица 6).

Таблица 6 – Классификации экологического мониторинга

Классификация	Тип	Определение
По пространственному признаку	Точечный	фокусируется на конкретном источнике воздействия (например, замеры на выходе из конкретной трубы предприятия)
	Локальный	охватывает территорию города, промышленного узла или отдельного предприятия
	Региональный	ведется в пределах крупных географических или административных единиц (область, бассейн реки)
	Национальный	осуществляется в границах всего государства и является основой его экологической политики
	Глобальный	направлен на слежение за общепланетарными изменениями (биосферные заповедники, озоновый слой, изменение климата)
По объекту наблюдения	Базовый (фоновый)	проводится в зонах, минимально затронутых человеком (заповедники). Его цель — зафиксировать эталонное состояние природы для сравнения с загрязненными участками
	Импактный	осуществляется непосредственно в зонах интенсивного антропогенного воздействия (районы аварий, крупные заводы)
	Тематический	выделяет конкретную экологическую проблему (например, мониторинг радиоактивного загрязнения или разливов нефти)
	Территориальный Акваториальный	различаются по среде наблюдения — на суше или в водных объектах соответственно.
По природным компонентам	Геологический	направлен на изучение состояния недр
	Атмосферный	контролируется качество воздуха
	Гидрологический	контролируется состояние поверхностных и подземных вод
	Геофизический	представляет собой систему наблюдений за сейсмичностью, геофизическими и геодинамическими процессами

Классификация	Тип	Определение
	Почвенный	контролируется состояние почв, их загрязнение и деградация для оценки и прогноза изменений
	Лесной	комплекс наблюдений за санитарным состоянием лесов, их изменением и прогнозирование развития лесного фонда
	Биологический	контролируется и оценивается состояние популяций растений и животных, их реакция на загрязнение.
	Геоботанический	
Зоологический		
По организационным особенностям	Международный	реализуется в рамках глобальных программ (например, под эгидой ООН) или трансграничных соглашений.
	Государственный	является основой ЕГСЭМ и проводится уполномоченными федеральными службами
	Местный	организуется муниципальными властями для решения локальных экологических задач
	Общественный	осуществляется некоммерческими организациями и инициативными группами граждан
	Ведомственный	проводится конкретными министерствами или компаниями на своих объектах

Современный экологический мониторинг реализуется через синтез различных методов и подходов:

1) Контактные методы

– Физико-химический анализ проб (лабораторные методы).

– Автоматизированные станции контроля, работающие в режиме реального времени.

2) Дистанционные методы

– Спутниковое зондирование Земли.

– Использование БПЛА.

3) Биомониторинг

Это использование живых организмов для оценки качества среды.

– Биоиндикация (определение состояния среды по наличию или поведению чувствительных видов).

– Биотестирование (оценка токсичности среды (воды, почвы) по реакции подопытных организмов в лабораторных условиях).

В эпоху избытка информации ключевой задачей становится не только сбор данных, но и их грамотная интерпретация. Основными инструментами для этого выступают *геоинформационные системы*

(ГИС) – многофункциональные программные комплексы, предназначенные для сбора, хранения, анализа и визуализации данных, имеющих пространственную привязку.

В экологии ГИС-технологии реализуют принцип «многослойной карты», где на единую цифровую основу (топографическую карту или космический снимок) последовательно накладываются различные информационные слои:

- Расположение источников выбросов (заводы, ТЭЦ);
- Данные наземных станций мониторинга о концентрации веществ;
- Гидрологические характеристики рек и рельеф местности;
- Плотность населения и состояние растительного покрова;
- Прочая информация.

Использование ГИС позволяет специалистам видеть экологический профиль территории в динамике, выявлять трансграничные потоки загрязнений и определять зоны наиболее высокого экологического риска.

Таким образом, современное представление об экологии акцентирует внимание на важности комплексного подхода к изучению и защите окружающей среды, обеспечении устойчивого развития и минимизации антропогенного воздействия на биосферу. В связи с этим разработка и внедрение малоотходных и безотходных технологий в настоящее время является актуальной проблемой в обеспечении экологической безопасности.

1.9. Контрольные вопросы

1. Кто и когда впервые ввел термин «экология», и как изменилось значение этой науки к XXI веку?
2. В чем заключается различие между объектами исследования аутоэкологии, демэкологии и синэкологии?
3. Какие три функциональные группы организмов выделяют в экосистеме, и какова роль каждой из них в круговороте веществ?
4. В чем заключается цель устойчивого развития?
5. Сформулируйте классическое определение устойчивого развития согласно докладу К. Брундтланд «Наше общее будущее».
6. Что такое осознанное потребление, и какой вклад оно вносит в реализацию Целей устойчивого развития (ЦУР)?
7. За счет чего возобновляемые источники энергии предотвращают изменение климата?
8. Что такое «зеленые рынки»?
9. Что такое ноосфера по В.И. Вернадскому?
10. Объясните механизм действия парникового эффекта. Какие газы вносят наибольший вклад в его усиление?
11. Что такое «планетарные границы», и превышение каких из них представляет наибольший риск для стабильности биосферы сегодня?
12. Приведите классификацию видов загрязнения (физическое, химическое, биологическое) и кратко охарактеризуйте каждый из них.
13. Приведите примеры положительного антропогенного воздействия на атмосферу, литосферу и гидросферу.
13. В чем разница между возобновляемыми, невозобновляемыми и неисчерпаемыми природными ресурсами? Приведите примеры.
14. Что такое ПДК, и чем данный показатель отличается от нормативов допустимого воздействия (ПДВ, ПДС)?
15. В чем заключается смысл проведения государственной экологической экспертизы и экологического аудита?
16. В чем разница между методами биоиндикации и биотестирования при проведении биологического мониторинга?
17. По каким признакам классифицируется экологический мониторинг?
18. Что такое ГСМОС?
19. Что такое фоновый мониторинг?
20. Зачем ГИС-технологии применяются при реализации экологического мониторинга?

2. АСПЕКТЫ УТИЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Основные понятия

В результате деятельности человека образуются отходы. *Отходами* являются побочные продукты, материалы, вещества, образующиеся при производстве изделий или оказании услуг, а также товары, утратившие свои функциональные свойства. В зависимости от происхождения отходы подразделяют на следующие виды:

- Технологические отходы производства. Этот вид отходов, в свою очередь, подразделяют на неустраняемые отходы (обрезки кромок, литники, облой и т.д.) и устраняемые (например, технологический брак).
- Отходы производственного потребления (тара, упаковка, детали машин).
- Отходы общественного потребления. Как правило, этот вид отходов относится к смешанным.

Все образующиеся отходы необходимо утилизировать. Понятие *утилизация* включает в себя весь спектр мероприятий по обращению с отходами на различных стадиях жизненного цикла изделий, обеспечение вторичного использования материалов, а также переработку отходов, забракованных или отслуживших свой срок изделий [19]. Целью утилизации является безопасное уничтожение отходов или их использование для получения энергии или изготовления изделий.

При *вторичной переработке* использованные материалы (отходы) преобразуют в сырье, которое в дальнейшем используют для получения новых изделий.

Под *рециклингом* чаще всего подразумевают возврат отходов после переработки в производственный цикл для изготовления аналогичных изделий. Например, из макулатуры производят бумагу или картон.

Правильная утилизация отходов имеет огромное значение на пути устойчивого развития.

2.2. Причины для утилизации отходов

Проблема мотивации людей к утилизации отходов с каждым днем становится более актуальной. Среди основных причин для утилизации материалов можно выделить следующие:

- Действующие нормативные документы, предписывающие порядок обращения с отходами. При нарушении законов об обращении с отходами привлекают к административной или уголовной ответственности.
- Экономическая выгода, поскольку отходы являются более дешевым источником веществ и материалов.

- Экологический аспект, то есть снижение загрязнения окружающей среды, включая уменьшение углеродного следа.
- Социально-экологическая ответственность людей в контексте сохранения биосферы.
- Некоторые ресурсы не могут быть восполнены за время, сопоставимое со временем существования человеческой цивилизации.
- Продвижение бренда в маркетинге, когда формируется положительный имидж компании, использующий вторичные материалы для производства фирменных изделий.

2.3. Нормативные документы по обращению с отходами

В России первым государственным актом о вторичном сырье является указ Петра I от 24 апреля 1714 года о сборе и использовании отходов холста.

В настоящее время существует перечень нормативных правовых актов (их отдельных положений) содержащих обязательные требования в области обращения с отходами производства и потребления. Иерархия действующих нормативных документов представлена на Рис. 12.

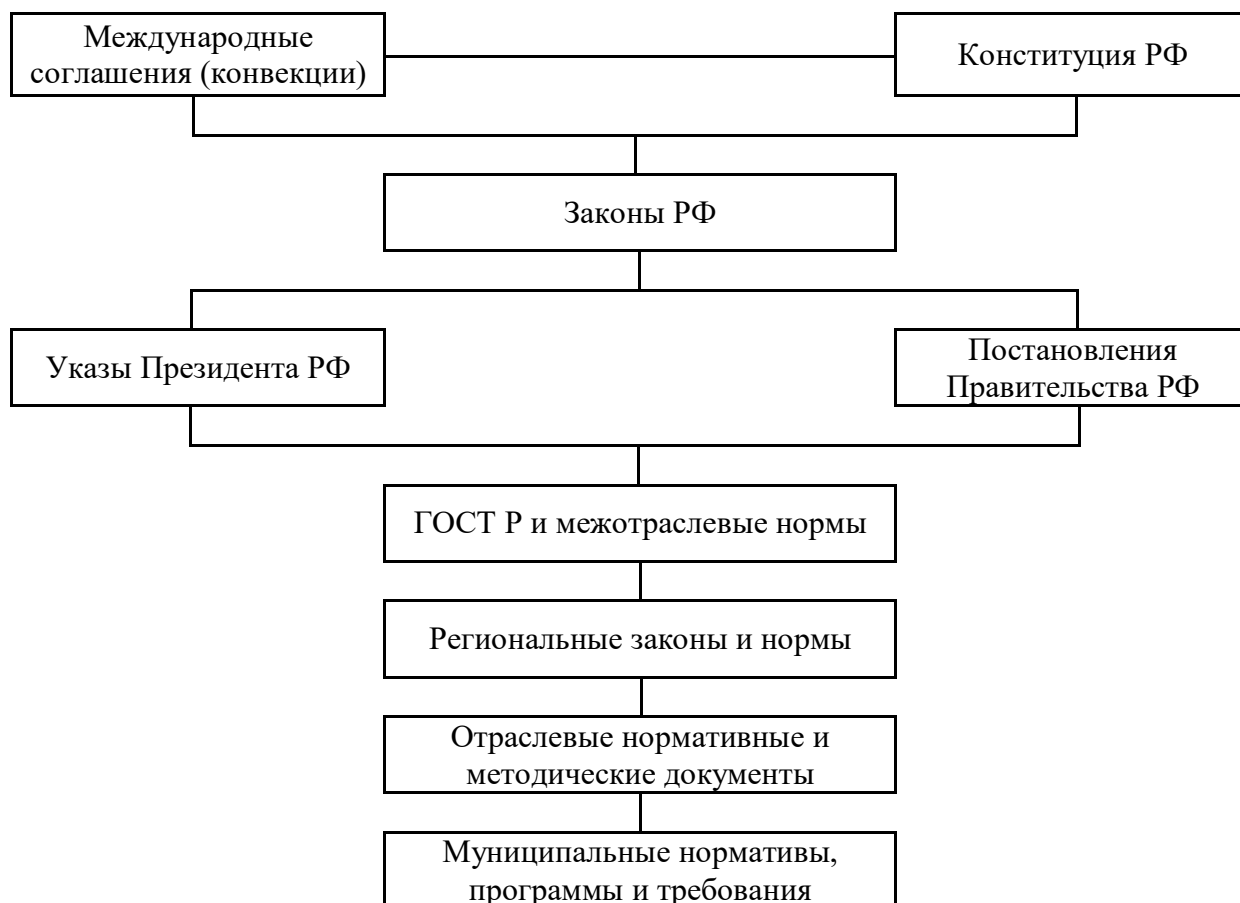


Рисунок 12 – Иерархия нормативных документов

- В качестве примеров приведем следующие нормативные документы:
- Федеральные законы № 7-ФЗ, № 89-ФЗ, № 195-ФЗ, № 451-ФЗ [14, 19-21].
 - Постановления Правительства РФ № 284, № 369, № 370, № 442, № 467, № 505, № 1073, № 1156, № 1255, № 1417, № 1520, № 1657, № 2010, № 2290, № 2314 [22-36].
 - Распоряжения Правительства РФ [37].
 - Приказы Минприроды РФ № 49, № 792, № 1021, №№ 1026 – 1030 [38-45].
 - Регламент (ЕС) 2025/40 Европейского парламента и Совета об упаковке и упаковочных отходах [46].
 - Требования Ростехнадзора.
 - Государственные общепринятые стандарты ГОСТ 2787-2024, ГОСТ Р ИСО 14001-2016, ГОСТ 34981-2023, ГОСТ Р 53692-2023, ГОСТ Р 54533-2011, ГОСТ Р 54564-2025, ГОСТ Р 70717-2023 [47-53].
 - Международные стандарты серии ISO, которые в России утверждены в качестве национальных [54, 55].
 - Распоряжения Правительства Москвы [56].

Рассмотрим кратко содержание некоторых упомянутых нормативных документов.

В соответствии с Конституцией РФ каждый имеет право на благоприятную окружающую среду, каждый обязан сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам, которые являются основой устойчивого развития, жизни и деятельности народов, проживающих на территории Российской Федерации.

Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ [20] устанавливает приоритеты при обращении с отходами в следующей последовательности:

- Максимально возможное использование сырья и исходных материалов.
- Предотвращение образования отходов.
- Снижение количества образующихся отходов и понижение их класса опасности.
- Обработка отходов.
- Утилизация отходов.
- Обезвреживание отходов.

Международные стандарты серии ISO 14000 объединяют 29 нормативов, направленных на сохранение окружающей среды. Важнейшие из них адаптированы к законодательству нашей страны посредством принятия стандартов серии ГОСТ Р ИСО. Например, в России стандарт ISO 14001 [54], который открывает серию ISO 14000, соответствует ГОСТ Р ИСО 14001-2016 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению».

Сфера действия Регламента (ЕС) 2025/40 распространяется на все упаковочные отходы, независимо от материала и происхождения. Данный регламент уделяет внимание сокращению количества упаковки, ее повторному использованию и утилизации [46].

По степени воздействия на окружающую среду все отходы делятся на пять классов [57, 58]. К I классу относят чрезвычайно опасные отходы, которые необратимо разрушают экологическую систему, к V классу – практически неопасные, когда экологическая система практически не нарушается.

ГОСТ Р 54533-2011 [51] регламентирует *энергетическую ликвидацию* полимерных отходов, то есть их сжигание с целью получения пара, тепловой или электрической энергии.

Постановлением Правительства РФ от 13.09.2024 № 1255 [30] утвержден *утилизационный сбор*. Данный сбор уплачивают на утилизацию транспортных средств после окончания их срока службы.

Расширенная ответственность производителей (РОП) действует в России с 2015 года и предусматривает *экологический сбор*. РОП регулируется Федеральным законом № 89-ФЗ [20]. Согласно РОП производитель (или импортер) товаров либо утилизирует их после утраты потребительских свойств, либо уплачивает экологический сбор.

Кодекс РФ об административных правонарушениях [21] устанавливает размеры штрафов за несоблюдение экологических и санитарно-эпидемиологических требований при обращении с отходами.

2.4. Стратегии переработки отходов

На Рисунке 13 представлена схема возможных стратегий утилизации отходов, основанных на способах воздействия на материал.

Примерами *повторного использования* могут служить: оборотная стеклотара, использование старых покрышек на судах в качестве демпферов, опилок для подстилок домашних животных, газет вместо упаковочного материала, износившихся текстильных изделий в качестве ветоши.

Под *вторичной переработкой* чаще всего подразумевают воздействия на материал, которые не сопровождаются явными химическими реакциями. После механического измельчения отходов (механический рециклинг) они могут быть использованы в качестве наполнителей, обеспечивающих улучшение функциональных свойств или снижающих стоимость конечной продукции.

Переработка через расплав характерна для отходов из термопластичных полимеров, таких как полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид. Данный метод особенно актуален для производственных отходов и отходов производственного потребления,

поскольку они не загрязнены, из одной марки полимера и не требуют сортировки.

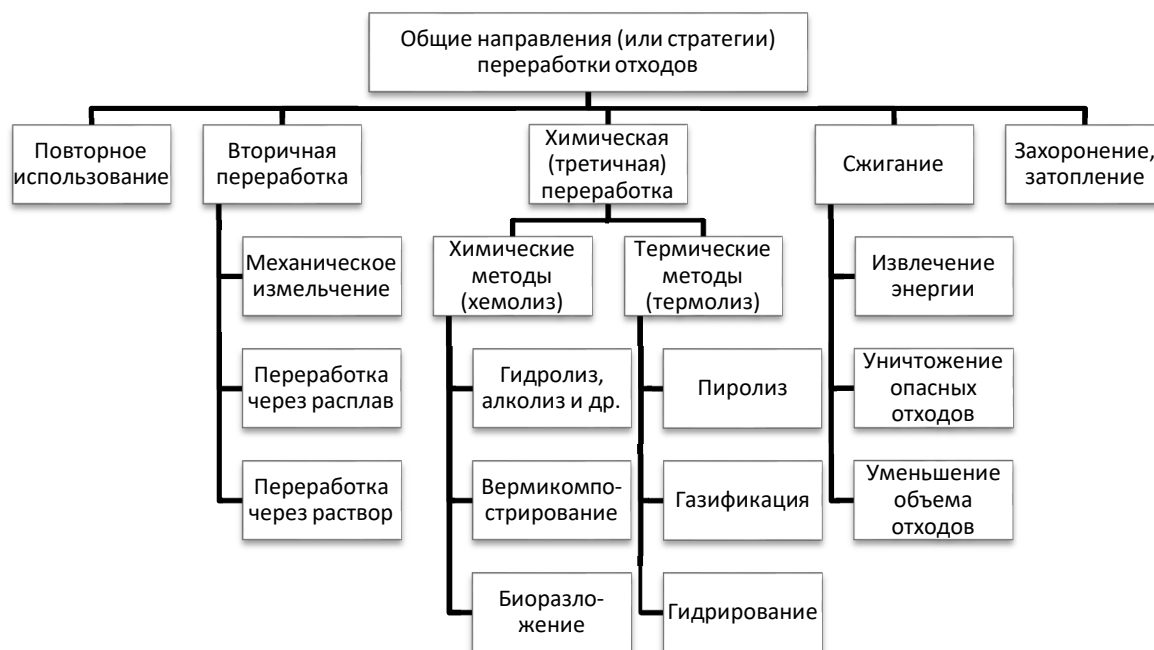


Рисунок 13 – Общая схема направлений утилизации отходов.

Переработка через раствор, как правило, не требует температурного воздействия на материал, что позволяет избежать термической деструкции полимеров и получить вторичный материал по свойствам не уступающим исходному. Кроме того, можно использовать селективное растворение для извлечения целевого компонента или очистки от загрязнений.

Преимуществом химических методов переработки является возможность деполимеризации и получения мономеров, которые потом используются при синтезе полимеров. Такие синтезированные полимеры ни в чем не уступают исходным материалам. Следует отметить, что хемолиз более выгоден, чем пиролиз, так как в оборот возвращаются высококачественные химические продукты.

В условиях окружающей среды или специально созданных условиях возможна биодegradация полимеров, основным механизмом которой является ферментативное расщепление органических соединений.

Основными термическими методами утилизации материалов являются пиролиз и газификация. Пиролиз – это разложение материалов на целевые компоненты под воздействием температуры без доступа кислорода. При газификации происходит преобразование органической части отходов под воздействием температуры в присутствии кислорода в горючие газы. Преимуществом термических методов является возможность утилизации многокомпонентных отходов и реактопластов, которые неспособны к плавлению и растворению.

Сжигание отходов в современном мире получило большое распространение. Этот способ утилизации регламентируется нормативными документами и является высокоэффективным методом ликвидации отходов. К недостаткам сжигания относят полную утрату ценных органических соединений.

Захоронение и затопление в настоящее время считаются неэффективными методами утилизации отходов и наносят наибольший ущерб окружающей среде. Однако захоронение может применяться целенаправленно для отсортированных отходов как специальное место их хранения до тех пор, пока не появятся технологии по их переработке в востребованные материалы для промышленности.

2.5. Способы сортировки отходов

В большинстве случаев сортировка отходов является трудоемким и затратным процессом. Также для сортировки могут потребоваться высокотехнологичные методы с использованием сложного и дорогостоящего оборудования. В связи с этим широкое распространение получил отдельный сбор мусора, когда отходы сортируются еще на стадии сбора.

В России для отдельного сбора мусора используют контейнеры, цвет или маркировка которых соответствует определенному виду отходов. Наиболее часто встречается отдельный сбор для стекла, бумаги, металлов, пластика и пищевых отходов. В перспективе пластик будут собирать отдельно по видам полимеров.



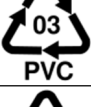
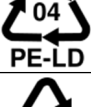
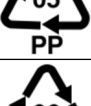
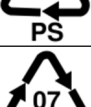
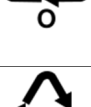
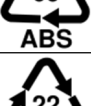
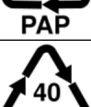





В настоящее время процесс разделения смешанных отходов практически всегда включает ручную сортировку. Идентифицировать материал можно по специальному знаку рециклинга (коду переработки), который состоит из треугольника, образованного тремя стрелками, цифрового обозначения материала и его буквенной аббревиатуры (таблица 7).

В основе автоматизированных процессов сортировки лежит какое-либо свойство компонентов. Автоматической сортировке подвергают как объемные продукты, так и измельченные.

Оптический метод сортировки (в видимом диапазоне длин волн) применяют для разделения крупных отходов по размеру и по цвету. После распознавания объект отбрасывается на соответствующий конвейер или в емкость с помощью встроенного манипулятора с механическим или пневматическим приводом. Необходимая траектория движения объектов может также задаваться с помощью системы сопел со сжатым воздухом, управляемой программным обеспечением.

С помощью магнитной сепарации отделяют как крупные, так мелкие элементы черных металлов.

Таблица 7 – Коды переработки (примеры)

Знак	Буквенная аббревиатура	Наименование материала
	РЕТ, ПЭТФ	Полиэтилентерефталат (лавсан)
	HDPE, ПЭНД, ПЭВП	Полиэтилен низкого давления (высокой плотности)
	PVC, ПВХ	Поливинилхлорид
	LDPE, ПЭВД, ПЭНП	Полиэтилен высокого давления (низкой плотности)
	PP, ПП	Полипропилен
	PS, ПС	Полистирол
	O, OTHER	Остальные виды пластика: Полиуретан, поликарбонат, полиамиды, полиакрилонитрил и др.
	ABS	АБС-пластик
	PAP	Бумага
	FE	Сталь
	ALU	Алюминий
	FOR	Древесина
	TEX, COT	Хлопок
	GL	Бесцветное стекло

Цветные металлы (алюминий, медь, латунь и др.) и их частицы отделяют от непроводящих фракций (бумага, стекло, пластик) методом, основанном на вихревых токах.

Для идентификации полимеров на автоматизированных линиях применяют методы ИК-спектроскопии и рентгеновского рассеяния. Полученные ИК-спектры компьютерная программа сравнивает с эталонными спектрами из базы. Рентгеноструктурный анализ благодаря рассеянию излучения электронными оболочками атомов помогает идентифицировать полимеры по наличию определенных атомов, например, хлора в поливинилхлориде.

На конвейерных лентах мусороперерабатывающих предприятий возможно комбинирование различных методов для комплексного разделения многокомпонентных отходов.

Популярным и недорогим методом разделения измельченных отходов является флотационное разделение (или флотация) с использованием воды, водных растворов или других жидкостей. Преимуществом метода является одновременное удаление загрязнений с поверхности целевого компонента. Полимеры, такие как полиэтилен и полипропилен, всплывают в воде. Их дальнейшее разделение между собой возможно в водно-спиртовых растворах. Для отделения «утонувших» в воде полимеров от минеральных частиц (песка) и частиц металлов, а также для разделения полимеров между собой, например, ПС от ПЭТФ, применяют растворы солей, в частности раствор нитрата калия.

Высокоэффективное разделение частиц, основанное на разности плотностей, проводят с помощью аэроциклонов и гидроциклонов. Интенсификация процессов разделения происходит за счет возникающих центробежных сил, которые в несколько сотен раз могут превышать ускорение свободного падения.

Узкоспециализированными способами сортировки отходов являются электростатическая сортировка пластмасс с помощью коронного или трибоэлектрического заряда, лазерно-пиролизной спектроскопии и по коэффициенту затухания ультразвуковых волн в материале.

2.6. Вторичное использование отходов металлов

В зависимости от типа металла их отходы подразделяют на следующие виды:

- черные металлы (отходы железоуглеродистых сплавов) [47],
- цветные металлы (отходы из медных, алюминиевых, свинцовых титановых и т.д. сплавов) [52],
- драгоценные металлы (золото, серебро, платина из технических устройств, ювелирных украшений, столовых приборов).

Нержавеющую сталь нельзя отнести к одному из упомянутых видов, поскольку она содержит почти равные количества железа и различных цветных металлов.

Использование отходов металлов экономически выгоднее, чем добыча и переработка первичного сырья, требует существенно меньше энергетических затрат, способствует сохранению природных ресурсов и сокращает негативное воздействие на окружающую среду.

Основным методом переработки отходов металлов является их переплавка. Экономия энергии при переплавке по сравнению с энергозатратами при переработке руды составляет 95 % для алюминия, 85 % для меди и 60-74 % для стали. Полученный из отходов металл по качеству не уступает металлам, произведенным из руды.

К современным промышленным способам рециклинга цветных металлов относят электролиз, который позволяет получать металлы высокой чистоты, а также разделять отходы сплавов на отдельные компоненты.

В России с 1 января 2018 года запрещено захоронение отходов, полностью состоящих из черных и цветных металлов [59].

2.7. Вторичное использование отходов стекла

Повторное использование стеклотары в своем исходном виде существенно снижает количество отходов стекла. Это может быть как промышленное использование, когда после мытья она применяется по своему изначальному назначению, так и бытовое использование, когда стеклянные емкости задействуют для аналогичных функций, например для приготовления кваса, консервирования, транспортирования жидкостей и т.д. Промышленное использование оборотной стеклотары ввиду затрат на ее сбор и доставку на предприятия проигрывает однократному применению стеклянных емкостей с последующим превращением их в стеклобой.

Стеклобой находят применение в дорожном строительстве в качестве замены щебня и песка, обеспечивая хорошие дренажные свойства.

В соответствии с ГОСТ 34981-2023 [49] отходы стекла классифицируются с целью их дальнейшей переработке по различным признакам, например, по классу опасности, по происхождению (отходы бытового или промышленного потребления), по химическому составу (натрий-кальций-силикатное, кварцевое, щелочноземельное силикатное, боросиликатное), по цвету (бесцветное, цветное).

В природных условиях стекло не теряет свои свойства много веков и имеет способность к многократной переработке через расплав. Поскольку переплавка стеклобоя происходит при более низкой температуре, чем при

первоначальной выплавке стекла, то меньше изнашиваются печи и тратится на 20 % меньше энергии, чем при производстве стеклянных изделий из природного сырья. Переплавка стекла также уменьшает использование природных ресурсов. Одна тонна отходов стекла эквивалента суммарно взятым компонентам – 700 кг песка, 250 кг известняка и 200 кг соды.

Отходы стекла находят широкое применение для производства пеностекла, стекловолокна, абразивов, стеклотары, жидкого стекла, облицовочных материалов.

Жидкое стекло (силикатный клей) получают из стеклобоя, который используют в качестве кремнеземсодержащего вещества. Сначала производят совместный размол отходов стекла с твердым гидроксидом щелочного металла в вибрационной мельнице. Затем осуществляют взаимодействие компонентов смеси в присутствии воды при температуре 85–100 °С. В зависимости от состава жидкие стекла подразделяют на калиевые, натриевые и литиевые. Жидкое стекло в дальнейшем используют для получения клеев, антипиренов, лакокрасочной продукции. Его покрытия придают защищаемым поверхностям водоотталкивающие, огнеупорные, антисептические свойства и лучшую устойчивость к механическим повреждениям.

Следует отметить, что хрусталь не подходит для переплавки на обычных предприятиях по утилизации стекла. Это связано с тем, что хрусталь в своем составе содержит большое количество оксида бария или оксида свинца, и при его переплавке выделяется большое количество токсичных газов. Однако допускается попадание нескольких бокалов или колб из хрусталя на 1 тонну перерабатываемого стекла.

В России с 1 января 2019 года запрещено захоронение отходов стекла и стеклянной тары [59].

2.8. Вторичная переработка полимеров

Под вторичной переработкой полимерных отходов принято понимать их переработку через механическое измельчение (дробление), расплавы или растворы.

Применение промышленных шредеров для измельчения отходов отличается низким уровнем шума и энергоэффективностью процесса по сравнению с другими методами. После механического рециклинга измельченные полимерные отходы используют в строительстве или в качестве сырья и добавок при производстве новых изделий.

Многие широко используемые конструкционные и упаковочные материалы производят на основе термопластичных полимеров. К этому классу относят те полимеры, которые способны к многократной переработке через расплав без существенной потери свойств, то есть

процесс плавление – затвердевание является обратимым. В качестве примеров синтетических крупнотоннажных термопластичных полимеров можно привести полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиамид. Для таких полимеров, как полиэтилен и полипропилен, переработка через расплав является единственно возможной, поскольку они не растворяются и не подвержены гидролизу. Очищенные и измельченные отходы термопластичных полимеров, как правило, используют для изготовления вторичного сырья (гранул). Для этого применяют промышленные грануляторы полимеров на основе двухшнековых экструдеров. Данный тип экструдеров позволяет вводить необходимые добавки и производить эффективное смешивание материалов. Для удаления загрязнений или нерасплавленных включений экструдер оснащают фильтром расплава. На выходе из экструзивной головки получают стренги, которые режут (рубят) на гранулы. Полученные гранулы являются готовым сырьем для дальнейшего применения.

Вторичную переработку через расплав обычно проводят не более 4-5 раз. Это связано с тем, что под воздействием высоких температур и сдвиговых напряжений происходят процессы механо- и термоокислительной деструкции. Также процессы деструкции полимеров происходят на всем протяжении эксплуатации изделий. Это приводит к ухудшению функциональных свойств изделий, в частности, наблюдается снижение прочности и разрывного удлинения.

Вторичная переработка полимеров через раствор (или рециклинг с использованием растворителей) отличается тем, что разрушения макромолекул полимеров практически не происходит. С помощью данного метода можно перерабатывать сложные (многокомпонентные) отходы и извлекать целевой компонент. Селективное растворение и фильтрация растворов позволяет получать полимеры, не уступающие по свойствам первичным. Растворители после использования рекуперировать и возвращают в производственный цикл. В качестве успешно применяемого рециклинга с использованием растворителей можно привести переработку отходов полистирола [60], поливинилхлорида (технология «Vinylloop»), полиамида [61], полиэтилентерефталата [62].

2.9. Химические методы утилизации полимеров

В этом разделе рассмотрим методы химической утилизации полимеров, в основе которых лежат процессы сольволиза. В процессе сольволиза происходит разложение таких полимеров, как ПЭТФ, полиамид, поликарбонат, полиуретан, до мономеров. В дальнейшем эти мономеры используют в качестве сырья, в том числе и для синтеза полимеров. Поскольку в производственный цикл возвращаются мономеры,

такой метод утилизации встречается под названием мономерный рециклинг. В зависимости от химического реагента, с помощью которого проводится разложение полимера, процессы сольволиза разделяют на виды (таблица 8).

Таблица 8 – Виды процессов сольволиза

Реагент	Наименование реакции
Вода	Гидролиз
Растворы кислот	Кислотный гидролиз
Растворы щелочей	Щелочной гидролиз
Аммиак	Аммонолиз
Амины	Аминолиз
Спирты	Алколиз
Метанол	Метанолиз

Утилизации методом разложения под действием реагентов могут быть подвергнуты полимеры, получаемые реакцией поликонденсации. Преимуществом метода является возможность переработать отходы из нескольких компонентов и загрязненные отходы, которые невозможно очистить из-за особенностей материала.

Сольволиз является высокотехнологичным способом утилизации, и его медленное распространение в мировой практике связано с большими капиталовложениями и использованием специального производственного оборудования, в частности, реакторов, способных работать с агрессивными химическими средами при повышенных температурах и давлении.

В настоящее время актуальным методом переработки полимеров является ферментативная. Она относится к биотехнологиям и не требует высоких температур и агрессивных химических сред. Таким образом, ферментативное разложение полимеров отвечает требованиям безопасности экосистем и является энергосберегающим процессом. К наиболее перспективным относят следующие ферменты: РЕТаза, МНЕТаза, нейлон-гидролазы и полилактидазы, применяемые для разложения ПЭТФ, полиамида и полилактида соответственно. В результате ферментативного разложения в производственный цикл возвращают мономеры.

Процессы биоразложения материалов могут происходить в естественных условиях или в специальных (промышленных) условиях, созданных человеком. Биоразложение, которое происходит при участии или под контролем человека, называют *компостированием*.

В настоящее время существуют различные виды компостирования, которое отличаются условиями проведения процессов разложения и

составом перерабатываемых отходов. Описание распространённых способов компостирования представлено в таблице 9.

Таблица 9 – Классификация промышленных способов компостирования

Наименование	Описание
Аэробное	Биоразложение происходит в условиях доступа воздуха. Для ускорения процессов возможна принудительная аэрация. В термофильной фазе разложения температура может достигать значений 40 – 60 °С.
Анаэробное	Проводится в закрытых емкостях или ямах, куда воздух практически не попадает (то есть без доступа кислорода). Этот метод также называют «холодным компостированием», поскольку температура практически не поднимается выше температуры окружающей среды.
Вермикомпостирование	Процесс переработки органических отходов в биогумус с помощью компостных червей и различных почвенных организмов (грибов, бактерий, актиномицетов, насекомых, членистоногих и т. д.)
Химическое	С целью ускорения процессов биоразложения или обезвреживания агрессивных соединений к органическим отходам специально добавляются химические реагенты. В результате достигаются благоприятные условия для развития микрофлоры. Метод применяют, например, при компостировании птичьего помета.

2.10. Термолиз отходов полимеров

Термолизом полимеров называют разрушение полимеров под воздействием высоких температур. Целью термолиза является получение газообразных продуктов, жидких фракций и твердых остатков. При термолизе происходит управляемое разрушение полимеров с возможностью дальнейшего использования продуктов деструкции. Термическое разрушение полимеров обычно протекает при температурах выше 300 °С. Преимуществом термолиза является возможность утилизации многокомпонентных материалов и опасных (медицинских) отходов. Также высокоэффективным методом считают термическое разложение изделий из реактопластов, поскольку реактопласты являются неплавкими и нерастворимыми полимерами. Таким образом, термолиз

является универсальным методом утилизации отходов, включающих полимерные материалы.

В процессе *пиролиза* происходит разложение органических соединений в отсутствие кислорода или его недостатке. В зависимости от температуры пиролиз подразделяют на низкотемпературный (300–550 °С), среднетемпературный (550–800 °С) и высокотемпературный (свыше 900 °С). В результате низкотемпературного пиролиза получают различные смолы и масла, среднетемпературного – смесь твердых (кокс, сажа), жидких и газообразных фракций, высокотемпературного – различные газообразные продукты.

К недостаткам пиролиза относят возможность образования токсичных газообразных веществ, которые необходимо улавливать.

Особым случаем пиролиза является термолиз полистирола (ПС) и полиметилметакрилата (ПММА). Эти полимеры, единственные среди всех пластиков, обладают способностью распадаться на мономеры при нагреве в диапазоне температур 300-600 °С.

Следует отметить, что пиролиз получил распространение для утилизации резинотехнических изделий (транспортных лент, автомобильных шин и т.д.). Он позволяет эффективно отделять металлокорд и получать технический углерод. Согласно Распоряжению Правительства РФ от 25.07.2017 №1589-р [59], складировать отслужившие автомобильные шины на полигонах твердых бытовых отходов не допускается.

Гидрирование (присоединение водорода к органическому веществу) часто является дополняющим процессом к пиролизу. В результате гидрирования получают высококачественные продукты, аналогичные бензину или дизельному топливу. Также есть возможность проведения реакций между водородом и атомами Cl, S, O и N с образованием кислот, воды и аммиака, соответственно.

Газификацию полимеров проводят в плазменных реакторах при температурах 1200 °С и выше. В результате получают синтез-газ (смесь CO, H₂, CH₄, CO₂). В дальнейшем синтез-газ используют в качестве сырья для получения различных химических и нефтехимических продуктов.

2.11. Сжигание отходов

Сжигание отходов – это контролируемый процесс окисления органических веществ в твердых, жидких и газообразных отходах. Сжигание является способом термического уничтожения опасных отходов (медицинских, химически или биологически загрязненных).

В России сжигание отходов проводят в соответствии с Федеральным законом № 89-ФЗ [20] и ГОСТ Р 54533-2011 [51]. Эти нормативные документы допускают сжигание отходов с целью выработки тепловой и

электрической энергии – так называемую топливную концепцию утилизации отходов. Поскольку полимерные отходы в большинстве случаев являются углеводородами и характеризуются высокой теплотворной способностью, то они могут эффективно применяться в качестве топлива. Калорийность полимерных отходов составляет 17 – 40 МДж/кг. Преимуществом сжигания является значительное (более чем на 90 %) уменьшение объема отходов и возможность утилизации загрязненных, смешанных и многокомпонентных материалов.

К недостаткам сжигания отходов относят образование вредных и токсичных продуктов в виде пепла (золы) и токсичных газов. Также в настоящее время технология сжигания чаще всего негативно оценивается представителями общественности.

Следует отметить, что такие высокотоксичные соединения, как диоксины и фураны, разрушаются под действием температур выше 600 °С. А при температурах выше 1300 °С эти соединения разрушаются менее, чем за 1 с. Промышленные установки для сжигания отходов (инсинераторы) имеют рабочие температуры 800–1200 °С, которые обеспечивают "дожигание" диоксинов и фуранов. На мусоросжигающих заводах в случаях, когда в камере первичного сгорания невысокая температура, используют вторичное дожигание газов.

Применяемые комплексы по очистке дымовых газов значительно уменьшают попадание в атмосферу твердых частиц, вредных и токсичных газов. Для обработки дымовых газов применяются механические, химические и сорбционные методы. Например, хлороводород (HCl), образующийся при сжигании отходов, может быть нейтрализован гидроксидом кальция для получения хлорида кальция, который в дальнейшем используют для оттаивания дорог зимой.

Отходы полимеров целенаправленно используют для сжигания в металлургии [51]. Они являются дополнительным источником энергии и в доменных печах разлагаются на восстанавливающие газы (CO, H₂), которые связывают кислород в процессе раскисления металла.

Зола, образующаяся при сжигании отходов, находит применение в различных областях. Ее используют для добавления в клинкер (промежуточный продукт при изготовлении цемента), в качестве минерального порошка для модификации асфальтобетона или структурирующей добавки к битуму, для укрепления грунтов в дорожном строительстве. Зола после сжигания полимеров не допускается использовать в сельском хозяйстве в качестве удобрения.

2.12. Контрольные вопросы

1. Какова роль переработки отходов в устойчивом развитии?
2. Какие известны общие направления (или стратегии) переработки отходов пластмасс?
3. Международная маркировка изделий, которые могут использоваться в качестве вторичного сырья.
4. Как вторичная переработка материалов используется в маркетинге?
5. Какой принцип заложен в классификации отходов по классу опасности?
6. В чем заключается РОП (расширенная ответственность производителей)?
7. Что является основным препятствием для широкого внедрения биоразлагаемых полимеров?
8. Особенности (свойства) термопластичных полимеров. Какие методы утилизации для них целесообразны?
9. Какие добавки, помимо полимера, содержат пластики?
10. В чём отличие синтетических волокон от искусственных?
11. Факторы, вызывающие деструкцию полимерных материалов, и способы противостояния деструкции.
12. Почему механические свойства стеклообразного полимера ухудшаются незначительно после вторичной переработки, несмотря на существенную деструкцию и понижение вязкости расплава?
13. В чем заключается проблема утилизации реторт-пакетов?
14. Гранулы ПЭ и ПП были случайно перемешаны. Как их можно разделить?
15. Что такое шредер (для полимеров)?
16. Как применяют жидкий азот при вторичной переработке материалов?
17. Что представляет собой экструдер-гранулятор?
18. Что такое пульпа (относительно к переработке материалов)?
19. Особенности (свойства) реактопластов. Какие методы утилизации для них целесообразны?
20. Из каких полимеров производят одноразовую посуду?
21. Какой вторичный полимер допустимо использовать для изготовления новой пищевой упаковки?
22. Почему автомобильные покрышки черного цвета? С какой целью вводят этот компонент?
23. Может ли вторичный полимер иметь лучшие свойства по сравнению с первичным?
24. Какими способами можно утилизировать отработанный ПЭТФ? Какой способ является наилучшим с точки зрения экологии и экономии сырьевых ресурсов?
25. Из чего изготавливают биоразлагаемые пакеты?

26. Преимущества рециклинга полимеров с использованием их растворения.
27. Можно ли переносить ацетон в одноразовом стаканчике?
28. Виды биоразложения.
29. В чем заключается вермикомпостирование?
30. Что такое инсинератор? Как обеспечивается безопасность его выбросов?

Заключение

Аспекты экологии и утилизации различных отходов являются как научно-техническими задачами, так и социальной ответственностью населения всего мира. Снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду и обеспечить устойчивое развитие позволят комплексные подходы, включающие следующие направления:

- совершенствование законодательства и международного сотрудничества,
- осознанное потребление ресурсов,
- внедрение инновационных материалов и технологий переработки их отходов,
- переход к циркулярной экономике,
- формирование экологической культуры.

Таким образом, сохранение природы и обеспечение безопасных условий для существования живых существ в настоящее время являются одним из важнейших вызовов для человечества.

Список использованных источников

1. Николайкин, Н. И. Экология: учебник для вузов / Н. И. Николайкин, Н. Е. Николайкина, О. П. Мелехова. — 3-е изд., стер. — Москва: Дрофа, 2004. — 624 с.
2. Наше общее будущее: доклад Междунар. комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР): пер. с англ. / под ред. С. А. Евтеева, Р. А. Перелета. — Москва: Прогресс, 1989. — 371 с.
3. Устойчивое развитие: Новые вызовы: учебник для вузов / под общ. ред. В. И. Данилова-Данильяна, Н. А. Пискуловой. — Москва: Аспект Пресс, 2015. — 336 с.
4. Экология: практикум / сост. В. П. Подольский, О. В. Рябова, В. И. Алферов. — Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2015. — 95 с.
5. Панин, В. Ф. Экология: общеэкологическая концепция биосферы и экономические рычаги преодоления Глобального экологического кризиса: учебник для вузов / В. Ф. Панин, А. И. Сечин, В. Д. Федосова; под ред. В. Ф. Панина. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 326 с.
6. Вернадский, В. И. Биосфера и ноосфера / В. И. Вернадский. — Москва: Наука, 1989. — 261 с.
7. Носова, А. О. Микропластик в почве: воздействие на экосистемы, потенциальные источники и аналитические методы исследования (обзор) / А. О. Носова, М. В. Успенская // Южно-Сибирский научный вестник. — 2022. — № 4 (44). — С. 28–38.
8. Findlay, H. S. Ocean acidification: another planetary boundary crossed / H. S. Findlay et al. // *Global Change Biology*. — 2024. — Vol. 31, no. 6. — P. e70238.
9. Кокурин, Д. И. Основы рециклинга. Общая теория: учебник для вузов / Д. И. Кокурин, К. Н. Назин. — Москва: Издательство Юрайт, 2026. — 121 с.
10. Полина, И. Н. Технология рекуперации газовых выбросов: учебное пособие [Электронный ресурс] / И. Н. Полина. — Сыктывкар: СЛИ, 2013. — 132 с.
11. Демина, Т. С. Биоразлагаемые полимерные материалы: учебное пособие / Т. С. Демина; под ред. П. Г. Бабаевского. — Москва: МАИ, 2023. — 69 с.
12. Экологическая безопасность: учеб.-метод. пособие / Е. В. Суркова, А. И. Мельченко, А. Г. Сухомлинова, Т. П. Францева. — Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2014. — 98 с.
13. Воробьева, Е. В. Экологическое нормирование : учебное пособие / Е. В. Воробьева, С. В. Гальченко, А. С. Чердакова. — Рязань: Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2022. — 44 с.

14. Об охране окружающей среды: Федер. закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2002. — № 2. — Ст. 133.
15. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности: межгосударственный стандарт: дата введения 01.01.1977. — Москва: Стандартинформ, 2007. — 8 с.
16. Об экологической экспертизе: Федер. закон от 23.11.1995 № 174-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 1995. — № 48. — Ст. 4556.
17. О техническом регулировании: Федер. закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2002. — № 52 (ч. 1). — Ст. 5140.
18. Мониторинг среды обитания: метод. указания к практ. занятиям [Электронный ресурс] / сост. А. П. Рвачева, О. А. Мулюкина. — Волгоград: ВолгГАСУ, 2016.
19. Об отходах производства и потребления: Федер. закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 31.07.2025) // Собрание законодательства Российской Федерации. — 1998.
20. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях: Федер. закон от 30.12.2001 № 195-ФЗ (ред. от 31.07.2025) // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2001.
21. О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления" и отдельные законодательные акты Российской Федерации": Федер. закон от 4 августа 2023 года № 451-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2023.
22. Постановление Правительства РФ от 09.04.2016 № 284 «Об установлении ставок сбора по каждой группе товаров, группе упаковки товаров, отходы от использования которых подлежат утилизации, уплачиваемого производителями товаров, импортерами товаров, которые не обеспечивают самостоятельную утилизацию отходов от использования товаров (экологического сбора)».
23. Постановление Правительства РФ от 11.05.2001 № 369 «Об утверждении правил обращения с ломом и отходами черных металлов и их отчуждение».
24. Постановление Правительства РФ от 11.05.2001 № 370 «Об утверждении правил обращения с ломом и отходами цветных металлов и их отчуждения».
25. Постановление Правительства РФ от 17.07.2003 № 442 «Об утверждении правил трансграничного перемещения отходов».

26. Постановление Правительства РФ от 26.05.2016 № 467 «Об утверждении положения о подтверждении исключения негативного воздействия на окружающую среду объектов размещения отходов».
27. Постановление Правительства РФ от 03.06.2016 № 505 «Об утверждении правил коммерческого учета объема и (или) массы твердых коммунальных отходов».
28. Постановление Правительства РФ от 08.10.2015 № 1073 «Об утверждении порядка взимания экологического сбора».
29. Постановление Правительства РФ от 12.11.2016 № 1156 «Об утверждении правил обращения с твердыми коммунальными отходами».
30. Постановление Правительства РФ от 13.09.2024 г. № 1255 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».
31. Постановление Правительства РФ от 24.12.2015 № 1417 «Об утверждении положения о декларировании производителями товаров, импортерами товаров количества выпущенных в обращение на территории Российской Федерации товаров, упаковки товаров, включенных в перечень товаров, упаковки товаров, подлежащих утилизации после утраты ими потребительских свойств».
32. Постановление Правительства РФ от 30.12.2015 № 1520 «Об утверждении правил создания, эксплуатации и модернизации единой государственной информационной системы учета отходов от использования товаров».
33. Постановление Правительства РФ от 12.10.2020 № 1657 «Об утверждении единых требований к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов».
34. Постановление Правительства РФ от 03.12.2020 № 2010 «Об утверждении правил представления производителями товаров, импортерами товаров отчетности о выполнении нормативов утилизации отходов от использования товаров».
35. Постановление Правительства РФ от 26.12.2020 № 2290 «О лицензировании деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов I-IV классов опасности».
36. Постановление Правительства РФ от 28.12.2020 № 2314 «Об утверждении правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде».
37. Распоряжение Правительства РФ от 31.12.2020 № 3721-р «Об утверждении перечня товаров, подлежащих утилизации после утраты

- ими потребительских свойств и перечня упаковки товаров, подлежащей утилизации после утраты ею потребительских свойств».
38. Приказ Минприроды РФ от 25.02.2010 № 49 «Об утверждении правил инвентаризации объектов размещения отходов».
 39. Приказ Минприроды РФ от 30.09.2011 № 792 «Об утверждении порядка ведения государственного кадастра отходов».
 40. Приказ Минприроды РФ от 07.12.2020 № 1021 «Об утверждении методических указаний по разработке проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение».
 41. Приказ Минприроды РФ от 08.12.2020 № 1026 «Об утверждении порядка паспортизации и типовых форм паспортов отходов I-IV классов опасности».
 42. Приказ Минприроды РФ от 08.12.2020 № 1027 «Об утверждении порядка подтверждения отнесения отходов I-V классов опасности к конкретному классу опасности».
 43. Приказ Минприроды РФ от 08.12.2020 № 1028 «Об утверждении порядка учета в области обращения с отходами».
 44. Приказ Минприроды РФ от 08.12.2020 № 1029 «Об утверждении порядка разработки и утверждения нормативов образования и отходов и лимитов на их размещения».
 45. Приказ Минприроды РФ от 08.12.2020 № 1030 «Об утверждении порядка проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду».
 46. Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on packaging and packaging waste.
 47. ГОСТ 2787-2024. Металлы черные вторичные. Общие технические условия: дата введения 01.01.2024. — Москва: Стандартинформ, 2024. — 63 с.
 48. ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению: дата введения 01.03.2017. — Москва: Стандартинформ, 2016. — 36 с.
 49. ГОСТ 34981-2023. Стеклобой для вторичного использования. Классификация. Общие положения: дата введения 01.04.2024. — Москва: Стандартинформ, 2023. — 10 с.
 50. ГОСТ Р 53692-2023. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов: дата введения 01.01.2024. — Москва: Стандартинформ, 2023. — 16 с.
 51. ГОСТ Р 54533-2011. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководящие принципы и методы утилизации полимерных отходов

- (ИСО 15270:2008): дата введения 01.01.2013. — Москва: Стандартинформ, 2019. — 19 с.
52. ГОСТ Р 54564-2025. Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Общие технические условия): дата введения 01.07.2025. — Москва: Стандартинформ, 2025. — 78 с.
 53. ГОСТ Р 70717-2023. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Обработка твердых коммунальных отходов для подготовки к дальнейшей утилизации. Общие требования: дата введения 01.06.2023. — Москва: Стандартинформ, 2023. — 24 с.
 54. ISO 14001:2015 "Environmental management systems - Requirements with guidance for use".
 55. ISO 15270:2008 «Plastics - Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste».
 56. Распоряжение Правительства Москвы от 28.12.2000 № 1279-ПП «О мерах по упорядочению приема потребительской тары у населения в г. Москве».
 57. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 20.12.2024) "Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов".
 58. Приказ Минприроды России от 04.12.2014 № 536 "Об утверждении критериев отнесения отходов к I-V классам опасности"
 59. Распоряжение Правительства РФ от 25.07.2017 №1589-р «Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается».
 60. Колесников, П. Полистирол: уникальный и перспективный / П. Колесников // Пластикс. – 2025. – № 6 (257). – С. 10-16.
 61. Tonsi, G. The selective dissolution-precipitation recycling: A review on this alternative approach for the recovery of nylon-based waste materials / G Tonsi, , C Maesani, MA Ortenzi, S Alini, C Pirola // Waste Manag. – 2025. – V. 204. – 114937.
 62. Utkarsh, U. Solvent based dissolution–precipitation of waste polyethylene terephthalate: economic and environmental performance metrics / U. Chaudhari, D.G. Kulas, A. Peralta, T. Hossain, A. Johnson, D. Hartley, R. Handler, B. Reck, V. Thompson, D. Watkins, D. Shonnard, // RSC Sustainability. – 2023. – V. 1. – P. 1849-1860.

Курындин Иван Сергеевич
Носова Анастасия Олеговна
Пономарева Алина Александровна
Мурадова Менсура Вахид Кызы

АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИИ И УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А