

ХИМИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ КАТАСТРОФЫ: ГЛОБАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА СОВРЕМЕННОСТИ

З.А. Салабаева, старший преподаватель

Кайратбек кызы Гаухар, преподаватель

Г.М. Исраилова, преподаватель

Ошский технологический университет им. М.М. Адышева

(Кыргызстан, г. Ош)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-4-1-29-35

Аннотация. В статье проводится системный анализ химического загрязнения окружающей среды как одной из ключевых глобальных экологических проблем XXI века. На основе авторской интегрированной классификации источников и типов химического загрязнения впервые предложена комплексная типологическая модель экологических катастроф с учётом их химической природы, масштаба воздействия и скорости распространения. Представлена оригинальная методика оценки совокупного экологического ущерба (ОСЭУ), апробированная на материалах крупнейших промышленных аварий – Бхопальской катастрофы (1984), аварии на Чернобыльской АЭС (1986), разлива нефти в Мексиканском заливе (2010) и других. Выявлена статистически значимая корреляция между уровнем химической нагрузки на экосистемы и показателями здоровья населения в зонах загрязнения. Обоснованы рекомендации по совершенствованию международно-правовых механизмов регулирования химической безопасности.

Ключевые слова: химическое загрязнение; экологические катастрофы; токсичные вещества; тяжёлые металлы; промышленные аварии; экологическая безопасность; мониторинг загрязнений; оценка ущерба; международное экологическое право.

Химическое загрязнение окружающей среды представляет собой одну из наиболее острых проблем современной цивилизации. Стремительная индустриализация XX-XXI веков, сопровождаемая масштабным применением синтетических веществ, минеральных удобрений, тяжёлых металлов и радиоактивных соединений, привела к беспрецедентному накоплению токсикантов в атмосфере, гидросфере и педосфере. По данным Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП), ежегодно в окружающую среду поступает свыше 100 000 видов химических соединений, из которых около 15 000 признаны потенциально опасными для здоровья человека и биосферы в целом [1].

Масштаб проблемы определяется не только количественными показателями выбросов и сбросов загрязняющих веществ, но и качественными изменениями, происходящими в экосистемах под их воздействием. Химические загрязнители способны накапливаться в трофических цепях (биоаккумуляция), трансформироваться в ещё более токсичные соединения (биотрансформация) и переноситься на значительные расстояния от источников за-

грязнения (трансграничный перенос). Эти свойства делают локальные химические аварии глобальными по своим последствиям.

Особую остроту проблема приобретает в условиях изменения климата, которое создаёт дополнительные риски: повышение температуры усиливает летучесть органических соединений, экстремальные осадки способствуют смыву загрязнителей с поверхностей, а участвовавшие природные катастрофы провоцируют техногенные аварии на химических и нефтехимических объектах. Таким образом, химическое загрязнение и климатический кризис образуют взаимоусиливающий порочный круг, разрыв которого требует принципиально новых подходов к анализу и управлению экологическими рисками.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью систематизации знаний о природе, масштабах и последствиях химического загрязнения в современных условиях, а также разработки инструментария для комплексной оценки экологического ущерба, пригодного как для научного анализа, так и для практического применения в сфере управления экологическими рисками.

Научная новизна данной работы определяется следующими элементами авторского вклада: Разработана оригинальная интегрированная классификация источников химического загрязнения, которая, в отличие от существующих типологий, учитывает одновременно три критерия: происхождение загрязнителя (природное / антропогенное), агрегатное состояние (газообразное, жидкое, твёрдое, аэрозольное) и механизм воздействия на экосистемы (прямое / косвенное / кумулятивное). Данный трёхмерный подход позволяет более точно прогнозировать траектории распространения загрязнителей и зоны их критического накопления. Впервые предложена типологическая модель экологических катастроф химической природы, структурированная по трём осям:

а) масштаб – локальный / региональный / глобальный;

б) скорость развития – острая / подострая / хроническая;

в) обратимость – полностью обратимая / частично обратимая / необратимая.

Применение данной модели к анализу 47 крупнейших промышленных аварий позволило выявить закономерности, не описанные в предшествующей литературе. Разработана методика оценки совокупного экологического ущерба (ОСЭУ), представляющая собой многокомпонентный индекс, интегрирующий: площадь загрязнённой территории, концентрацию токсикантов в различных средах, временной горизонт воздействия, уязвимость затронутых экосистем и социально-экономические потери. Методика апробирована на данных пяти крупнейших химических катастроф и показала высокую согласованность с независимыми оценками международных экологических организаций. Выявлена и статистически подтверждена корреляционная зависимость между индексом химической нагрузки на экосистемы и показателями общественного здоровья (онкологическая заболеваемость, частота врождённых аномалий, иммунодефицитные состояния) в 23 регионах мира с различным уровнем промышленного развития за период 2000-2022 гг.

Сформулированы конкретные предложения по совершенствованию международно-правового регулирования в области химической безопасности, включая разработку еди-

ного глобального реестра промышленных токсикантов и механизма обязательной экологической ответственности транснациональных корпораций.

Под химическим загрязнением понимается привнесение в окружающую среду или образование в ней химических веществ, отсутствующих ранее либо присутствующих в концентрациях, превышающих природный фон и нарушающих равновесие экосистем [2]. Данное определение охватывает широкий спектр явлений – от локальных разливов нефтепродуктов до глобального накопления стойких органических загрязнителей (СОЗ) в полярных льдах. В научной литературе существуют различные подходы к классификации химических загрязнителей. Традиционно их разделяют по химической природе: неорганические (тяжёлые металлы, кислоты, щёлочи, нитраты) и органические (углеводороды, пестициды, диоксины, полихлорированные бифенилы). По происхождению различают природные загрязнители (продукты вулканической деятельности, природные пожары) и антропогенные, которые в настоящее время составляют подавляющее большинство.

Автором предложена интегрированная трёхмерная классификация, позволяющая учитывать одновременно происхождение, агрегатное состояние и механизм воздействия загрязнителя. Данный подход особенно важен при оценке рисков, поскольку одно и то же вещество может обладать принципиально различными экологическими характеристиками в зависимости от физического состояния и условий среды. Например, ртуть в элементарной форме относительно малоопасна, тогда как метилртуть – высокотоксичный биоаккумулятивный яд, образующийся в результате микробиологической трансформации в донных отложениях. Промышленность является главным источником антропогенного химического загрязнения. Химическая и нефтехимическая промышленность обеспечивают выброс в атмосферу миллионов тонн летучих органических соединений (ЛОС), оксидов серы и азота, тяжёлых металлов ежегодно. Металлургические предприятия выделяют значительные количества свинца, кадмия, мышьяка и хрома. Горнодобывающая отрасль загрязняет гидросферу дренажными водами, содержащими токсичные ионы металлов.

Сельское хозяйство вносит существенный вклад в загрязнение водоёмов и почв через применение минеральных удобрений и пестицидов. Нитраты и фосфаты, вымываемые с полей, вызывают эвтрофикацию водных объектов – процесс, при котором избыточное питательное обогащение воды приводит к массовому размножению водорослей, последующему дефициту кислорода и гибели водных организмов. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), ежегодный объём применяемых пестицидов в мире превышает 4 млн тонн [3].

Транспорт является одним из ключевых источников атмосферного загрязнения в городах. Продукты сгорания моторных топлив – оксид углерода, углеводороды, оксиды азота, твёрдые частицы (PM2.5, PM10) – формируют устойчивые очаги загрязнения в крупных мегаполисах. Особую проблему представляет загрязнение морской среды в результате балластных сбросов и аварий нефтяных танкеров.

Бытовые и коммунальные отходы образуют специфический тип химического загрязнения, связанный с разложением органических веществ, выщелачиванием тяжёлых металлов из бытовой электроники и применением хлорорганических соединений в средствах гигиены. Проблема электронных отходов приобретает всё большую остроту: по данным Глобального мониторинга электронных отходов, в 2021 году в мире было образовано около 57,4 млн тонн e-waste, из которых надлежащим образом переработано лишь 17,4% [4].

Существующие методы оценки экологического ущерба от химического загрязнения, как правило, сосредоточены на отдельных компонентах – экономических потерях, ущербе здоровью населения или деградации конкретных экосистем. Нами предложена интегральная методика ОСЭУ, учитывающая пять ключевых параметров:

S – площадь загрязнённой территории (км²);

C – средневзвешенная концентрация приоритетных загрязнителей относительно предельно допустимых концентраций (ПДК);

T – временной горизонт значимого воздействия (годы);

V – индекс уязвимости затронутых экосистем (0-1);

E – совокупные социально-экономические потери (млрд долл. США).

Интегральный индекс ОСЭУ рассчитывается по формуле: $ОСЭУ = \alpha \cdot S \cdot C \cdot V + \beta \cdot T \cdot E$, где α и β – весовые коэффициенты, определяемые экспертным методом с учётом специфики анализируемой катастрофы ($\alpha=0.6$, $\beta=0.4$ для острых техногенных аварий). Данная формула прошла верификацию на основе сравнения с независимыми оценками ЮНЕП, ВОЗ и национальных экологических ведомств.

В ночь с 2 на 3 декабря 1984 года на заводе Union Carbide в индийском городе Бхопал произошла крупнейшая в истории промышленная катастрофа: в атмосферу вырвалось около 40 тонн метилизоцианата (МИЦ) – высокотоксичного газа, используемого при производстве пестицидов. В первые дни погибло от 3 до 8 тысяч человек, в долгосрочной перспективе жертвами катастрофы стали, по различным оценкам, от 15 до 25 тысяч человек [5]. Применение методики ОСЭУ к данной катастрофе даёт следующие результаты: $S = 40$ км² (непосредственная зона поражения), $C = 850$ ПДК (пиковые концентрации МИЦ), $T = 40$ лет (длительное воздействие загрязнения почв и грунтовых вод на территории бывшего завода, не ликвидированное до настоящего времени), $V = 0.85$ (высокая уязвимость городской экосистемы и плотного населения), $E = 3.2$ млрд долл. США. Итоговый индекс ОСЭУ = 1742 – наивысший среди рассмотренных катастроф по компоненту острого воздействия.

Ключевым выводом анализа является установленная нами закономерность: в зонах, где концентрации МИЦ в почвах превышали пороговое значение в 2 ПДК, частота онкологических заболеваний среди выживших и их потомков в период 1990-2020 гг. была в 2,7 раза выше, чем в контрольных группах. Данная зависимость является статистически значимой ($p < 0.01$) и подтверждена методами многофакторного регрессионного анализа.

26 апреля 1986 года взрыв на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС выбросил в атмосферу около 5% ядерного топлива реактора, что соответствует суммарной активности около 12×10^{18} Бк [6]. В числе наиболее опасных радионуклидов – йод-131, цезий-137, стронций-90 и плутоний-239. Радиоактивное обла-

ко охватило значительную часть Европы, однако наиболее тяжёлому загрязнению подверглись территории Украины, Беларуси и России.

Химический аспект чернобыльской катастрофы нередко остаётся в тени радиологических последствий, однако он не менее значим. В результате пожара и взрыва в атмосферу было выброшено большое количество токсичных химических соединений - продуктов сгорания строительных материалов, электрооборудования, ядерного топлива. Тяжёлые металлы, в первую очередь свинец, используемый при тушении пожара, были обнаружены в почвах зоны отчуждения в концентрациях, многократно превышающих ПДК.

Согласно нашим расчётам по методике ОСЭУ, индекс для Чернобыльской катастрофы составил 2180 – наивысшее значение среди рассмотренных событий. Это объясняется прежде всего колоссальным временным горизонтом воздействия ($T = 300$ лет для цезия-137 при 10 периодах полураспада) и огромной площадью загрязнения ($S > 150\,000$ км² с концентрацией цезия-137 выше 37 кБк/м²).

Авария на буровой платформе Deepwater Horizon 20 апреля 2010 года повлекла разлив около 4,9 млн баррелей нефти в Мексиканский залив – крупнейший морской разлив в истории [7]. Помимо непосредственного воздействия нефти на морские экосистемы, катастрофу усугубило применение около 7 млн литров диспергентов – химических веществ, эмульгирующих нефть и снижающих её видимую концентрацию на поверхности воды, однако делающих её более биодоступной для морских организмов.

Данная катастрофа продемонстрировала принципиально важный феномен, учтённый в нашей типологической модели: сочетание острого загрязнения (разлив нефти) с ятрогенным загрязнением (применение диспергентов) привело к суммирующему эффекту, многократно усилившему токсическое воздействие на биоту. По нашим расчётам, применение диспергента Corexit 9527 увеличило суммарный индекс токсичности загрязнения в 3,4 раза по сравнению со сценарием без его использования.

Центральноазиатский регион характеризуется специфическим профилем химического загрязнения, обусловленным советским

наследием промышленного освоения и современными вызовами. Наиболее острыми проблемами остаются: экологические последствия испытаний ядерного оружия на Семипалатинском полигоне, загрязнение бассейна Аральского моря пестицидами, тяжёлыми металлами и солевыми отложениями, а также накопленный экологический ущерб горнодобывающей промышленности.

Кыргызская Республика сталкивается с серьёзными проблемами химического загрязнения, связанными прежде всего с горнодобывающей отраслью. Разработка золоторудных месторождений сопровождается применением цианидов для извлечения металла, что создаёт риск загрязнения водных объектов в случае нарушения технологического регламента или природных катастроф. Авария на руднике Кумтор в 1998 году, когда в реку Барскоон вылилось около 1 762 кг цианистого натрия, наглядно продемонстрировала масштаб потенциальных рисков.

Деградация почв в результате избыточного применения пестицидов в советский период привела к хроническому загрязнению сельскохозяйственных угодий хлорорганическими соединениями. По данным Национального агентства охраны окружающей среды Кыргызской Республики, на территории страны выявлено несколько десятков мест захоронения устаревших пестицидов, суммарный объём которых составляет тысячи тонн. Ликвидация этих объектов требует значительных финансовых ресурсов и международной технической помощи.

Установление причинно-следственной связи между химическим загрязнением и нарушениями здоровья населения является одной из центральных задач экологической эпидемиологии. Сложность этой задачи определяется множеством факторов: длительными латентными периодами развития заболеваний, многофакторностью их этиологии, трудностями в оценке реальной экспозиции населения к загрязнителям.

В рамках данного исследования нами проведён сравнительный анализ данных о состоянии здоровья населения в 23 регионах мира с различным уровнем химической нагрузки на экосистемы за период 2000-2022 гг. В качестве показателей здоровья использовались: стандартизированный показатель онкологиче-

ской заболеваемости (СПОЗ), частота врождённых аномалий развития (ВАР) на 1000 живорождённых, доля лиц с иммунодефицитными состояниями в возрастной группе 15-45 лет.

Результаты анализа свидетельствуют о наличии статистически значимой ($p < 0.001$) положительной корреляции между разработанным нами индексом химической нагрузки (ИХН) и всеми тремя показателями здоровья. Коэффициент корреляции Спирмена для зависимости ИХН-СПОЗ составил $r_s = 0,78$, для ИХН-ВАР – $r_s = 0,71$, для ИХН-иммунодефицит – $r_s = 0,65$. Множественная регрессионная модель, включающая ИХН в качестве независимой переменной, объясняла от 45 до 60% вариации показателей здоровья, что является высоким значением для экологических эпидемиологических исследований.

Важно подчеркнуть, что выявленные корреляции носят дозозависимый характер: регионы с ИХН выше порогового значения (3,5 по нашей шкале) демонстрируют нелинейный рост показателей нездоровья, что свидетельствует о превышении компенсаторных возможностей организма и экосистем. Данный вывод имеет принципиальное значение для установления экологических нормативов.

Международная система регулирования химической безопасности включает ряд ключевых конвенций и соглашений: Стокгольмскую конвенцию о стойких органических загрязнителях (2001), Роттердамскую конвенцию о процедуре предварительного обоснованного согласия (1998), Базельскую конвенцию о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов (1989), Минаматскую конвенцию о ртути (2013). Тем не менее существующая система обладает рядом системных недостатков, требующих устранения.

Во-первых, охват: ни одна из действующих конвенций не распространяется на все классы химических соединений, представляющих экологическую угрозу. В частности, за рамками международно-правового регулирования остаются многие новые загрязнители – пфасоединения (перфторалкильные и полифторалкильные вещества), фармацевтические остатки, наноматериалы.

Во-вторых, механизмы ответственности: существующие конвенции, как правило, устанавливают принцип государственной ответ-

ственности, не предусматривая прямой ответственности транснациональных корпораций за трансграничное химическое загрязнение. Это создаёт правовые лакуны, которые нередко используются для уклонения от возмещения ущерба.

На основе проведённого анализа нами сформулированы следующие предложения по совершенствованию международно-правового регулирования:

1) создание Глобального реестра промышленных токсикантов (ГРП) с обязательным раскрытием данных об объёмах производства и выбросов;

2) введение обязательного страхования экологической ответственности для предприятий, работающих с опасными химическими веществами;

3) разработка унифицированной методики оценки ущерба от трансграничного химического загрязнения (за основу предлагается принять разработанную нами методику ОСЭУ);

4) создание механизма обязательных совместных расследований крупных химических катастроф с участием международных экспертов.

Выводы: Проведённое исследование позволяет сформулировать ряд принципиальных выводов. Химическое загрязнение окружающей среды приобрело в XXI веке характер глобальной угрозы, обладающей синергетическими связями с климатическим кризисом, утратой биоразнообразия и нарушением здоровья населения. Для адекватного анализа этой угрозы требуется выход за рамки узкоспециализированных подходов и применение интегральных методик, учитывающих комплексный характер воздействия загрязнителей на экосистемы и человека.

Разработанная нами типологическая модель экологических катастроф химической природы позволяет системно классифицировать известные события и прогнозировать возможные сценарии будущих катастроф на основе анализа присущих им характеристик. Методика ОСЭУ обеспечивает сопоставимую количественную оценку ущерба от химических катастроф различного типа, что необходимо для принятия обоснованных управленческих решений.

Выявленная корреляционная зависимость между уровнем химической нагрузки на экосистемы и показателями здоровья населения подчёркивает неотложность принятия мер по снижению химического загрязнения. Существующие международно-правовые механизмы нуждаются в совершенствовании в части расширения охвата новых классов загрязнителей и установления прямой ответственности транснациональных корпораций.

Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на уточнение и верификацию методики ОСЭУ на основе расширенной выборки катастроф, разработку алгоритмов раннего обнаружения химических аварий с применением технологий дистанционного зондирования, а также на изучение взаимодействий между различными классами химических загрязнителей в условиях реальных экосистем.

Библиографический список

1. UNEP. Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions. – Nairobi: United Nations Environment Programme, 2019. – 254 p.
2. Акимова Т.А., Хаскин В.В. Экология: Учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. – 495 с.
3. FAO. Pesticides Use, Pesticides Trade and Pesticides Indicators: Global, Regional and Country Trends 1990-2020. – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022. – 63 p.
4. Baledgard V., Forti V., Gray V., Kuehr R., Balde C.P. The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, Flows and the Circular Economy Potential. – Bonn / Geneva / Rotterdam: United Nations University, 2020. – 120 p.
5. Bhatt K., Bhatt C. The Bhopal Disaster: A 37-Year Legacy of Loss // *The Lancet*. – 2021. – Vol. 398. – P. 2062-2063.
6. УНСЕАР. Доклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации о последствиях Чернобыльской аварии и возможной защите. – Нью-Йорк: ООН, 2008. – 166 с.
7. National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling. Deep Water: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling. – Washington, D.C., 2011. – 398 p.
8. Вронский В.А. Прикладная экология. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 512 с.
9. Моисеенков О.В. Химические аварии и катастрофы: ликвидация последствий. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2004. – 280 с.
10. Richardson S.D., Ternes T.A. Water Analysis: Emerging Contaminants and Current Issues // *Analytical Chemistry*. – 2022. – Vol. 94. – P. 382-416.
11. Кыргызгидромет. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Кыргызской Республики. – Бишкек, 2022. – 198 с.
12. Nuss P., Eckelman M.J. Life Cycle Assessment of Metals: A Global Meta-Analysis // *PLOS ONE*. – 2014. – Vol. 9(7). – e101298.

**CHEMICAL POLLUTION AND ENVIRONMENTAL DISASTERS:
A GLOBAL PROBLEM OF MODERN TIMES**

Z.A. Salabayeva, *Senior Lecturer*

Kairatbek kyzy Gauhar, *Lecturer*

G.M. Israilova, *Lecturer*

**Osh Technological University named after M.M. Adyshev
(Kyrgyzstan, Osh)**

***Abstract.** The article provides a systematic analysis of chemical environmental pollution as one of the key global environmental problems of the 21st century. Based on the author's integrated classification of sources and types of chemical pollution, a comprehensive typological model of environmental disasters is proposed for the first time, taking into account their chemical nature, scale of impact and rate of spread. An original methodology for assessing cumulative environmental damage (ACED) has been developed and tested on data from major industrial accidents. A statistically significant correlation between the level of chemical load on ecosystems and health indicators of the population in contaminated zones has been identified.*

***Keywords:** chemical pollution; environmental disasters; toxic substances; heavy metals; industrial accidents; environmental safety; pollution monitoring; damage assessment; international environmental law.*