

504.4:504.5:574.63

**«ХИМИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В
ГЛОБАЛЬНОМ МАСШТАБЕ: ОТ ИСТОЧНИКОВ К
ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКИМ ПОСЛЕДСТВИЯМ»**

Қуат Эльназ Едилқызы

магистрантка 1 курса образовательной программы «Биология с основами
микробиологии»

Атырауский университет имени Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика
Казахстан

Научный руководитель, PhD — Нургалиева А.К.

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ источников химического загрязнения водных экосистем с акцентом на их таксономию, механизмы миграции и экотоксикологические последствия. Рассматривается современное состояние гидросферы в условиях усиливающегося антропогенного давления и глобальных климатических изменений, способствующих трансграничному переносу загрязнителей. Проведена систематизация источников загрязнения по генетическому, пространственному и функциональному признакам с выделением точечных и диффузных форм воздействия. Особое внимание уделено промышленному, сельскохозяйственному и коммунальному секторам как ключевым поставщикам токсикантов, включая тяжелые металлы, стойкие органические загрязнители, биогенные элементы, микропластик и фармацевтические соединения. Проанализированы механизмы трансформации загрязняющих веществ в водной среде, включая процессы биоаккумуляции, биомагнификации и синергетического взаимодействия. Отдельно рассмотрены региональные особенности Каспийского бассейна, иллюстрирующие сложность управления рисками в условиях интенсивной нефтедобычи. Показано, что химическое загрязнение носит системный характер и требует интегрированного подхода к мониторингу и регулированию. Сформулированы приоритетные направления снижения экологической нагрузки, включая технологическую модернизацию, устойчивое природопользование и развитие международного сотрудничества.

Ключевые слова: химическое загрязнение, водные экосистемы, антропогенные источники, диффузное загрязнение, тяжелые металлы, микропластик, эвтрофикация, биоаккумуляция, биомагнификация, экотоксикология.

Введение. Современное состояние гидросферы характеризуется беспрецедентным уровнем химического стресса, вызванного интеграцией антропогенных метаболитов в естественные биогеохимические циклы. Химическое загрязнение водных экосистем определяется как поступление в водную среду веществ в концентрациях, превышающих фоновые уровни, что приводит к деградации качества воды и нарушению структурно-функциональной целостности водных сообществ. В условиях глобального изменения климата и интенсификации промышленного производства данная проблема приобретает трансграничный характер, требуя глубокого понимания генезиса и механизмов миграции токсикантов.

Классификация источников загрязнения: фундаментальные подходы и таксономия. Систематизация источников загрязнения является первичным этапом в разработке стратегий мониторинга и управления водными ресурсами. Традиционно источники подразделяются на естественные и антропогенные, однако современная экологическая наука выделяет более детальные уровни классификации, основанные на механизмах воздействия и пространственной локализации.

Генетическая классификация: естественные и антропогенные факторы. Естественные источники загрязнения функционируют независимо от человеческой деятельности, хотя их интенсивность может опосредованно модулироваться техногенными

изменениями ландшафта. Ключевым процессом является разрушение и выветривание горных пород, при котором грунтовые воды вымывают минеральные соли и ионы металлов, транспортируя их в поверхностные водотоки. Вулканическая активность вносит вклад в химический состав воды через выброс газов (диоксид серы, сероводород) и пепла, которые при взаимодействии с атмосферной влагой формируют кислые осадки. Биологические процессы внутри самих водоемов, такие как разложение органического вещества и продукты метаболизма гидробионтов, также могут приводить к локальному повышению концентраций определенных соединений, что классифицируется как естественное загрязнение.

Антропогенные источники, порожденные человеческой цивилизацией, демонстрируют экспоненциальный рост разнообразия химических агентов. В этой категории критически важным является разделение на первичные и вторичные источники. Первичные источники характеризуются непосредственным введением чужеродных веществ в водную среду — это промышленные стоки, коммунальные выбросы и утечки при транспортировке. Вторичное загрязнение возникает как результат нарушения экологического равновесия. Примером служит мобилизация тяжелых металлов из донных отложений при изменении pH воды или высвобождение биогенных элементов при массовой гибели водорослей в эвтрофных водоемах.

Пространственная и функциональная структура источников. Для целей экологического нормирования источники классифицируют по характеру их локализации на точечные и диффузные.

- Точечные источники: Обладают четкой пространственной привязкой (трубы заводов, выпуски очистных сооружений). Это позволяет осуществлять прямой контроль объема и состава сбросов.
- Диффузные источники: Формируются на обширных площадях водосбора. Основным драйвером здесь выступает сельское хозяйство (смыв с полей) и урбанизированные территории (ливневый сток с дорог). Диффузное загрязнение крайне сложно поддается контролю, так как оно зависит от метеорологических условий и эрозионных процессов.

Тип источника	Механизм переноса	Основные химические агенты
Промышленные предприятия	Прямой сброс, фильтрация шламов	Тяжелые металлы, фенолы, ПАУ, кислоты
Сельское хозяйство	Поверхностный и дренажный сток	Нитраты, фосфаты, пестициды, антибиотики
Коммунальный сектор	Канализационные системы, свалки	ПАВ, микропластик, лекарственные остатки
Транспортная сеть	Ливневый сток, аварийные разливы	Нефтепродукты, свинец, антигололедные соли
Атмосферное выпадение	Сухие и влажные осадки	Соединения серы и азота (кислотные дожди)

Таблица 1 - Систематика основных источников химического загрязнения и их приоритетных загрязнителей

Промышленный сектор: доминантные механизмы техногенного воздействия. Промышленность остается наиболее агрессивным источником химического загрязнения в силу высокой концентрации и токсичности специфических ингредиентов. Крупные промышленные объекты ежедневно генерируют десятки тысяч литров сточных вод, состав которых определяется профилем производства.

Горнодобывающая промышленность и металлургия. Данный сектор является основным поставщиком тяжелых металлов. В процессе добычи и обогащения руд образуются отходы, содержащие ртуть, кадмий, мышьяк, свинец и медь. Тяжелые металлы обладают способностью к биоаккумуляции и крайне низкой скоростью выведения из

экосистем. Ртуть попадая в донные отложения, под воздействием анаэробных бактерий трансформируется в метилртуть — нейротоксичное соединение, которое накапливается в пищевых цепях и представляет смертельную угрозу для высших хищников и человека.

Металлургические и гальванические предприятия сбрасывают стоки, насыщенные ионами хрома, никеля и цинка. Эти металлы ингибируют ферментативные процессы у гидробионтов и вызывают структурные изменения в клеточных мембранах. Кроме того, кислые стоки шахт и заводов резко изменяют водородный показатель (рН) воды, что приводит к гибели чувствительных видов флоры и фауны и способствует мобилизации других токсикантов из почв и осадков.

Нефтепереработка и нефтехимия. Нефтехимические производства поставляют в водные объекты широкий спектр органических токсикантов, среди которых особое место занимают фенолы. Фенолы являются чрезвычайно опасными антропогенными загрязнителями; их ароматическая структура делает их резистентными к биологической очистке. Высокие концентрации фенолов губительны для микрофлоры очистных сооружений и природных водоемов, что блокирует процессы естественного самоочищения. В водной среде фенолы ингибируют фотосинтез у водорослей и разрушают клеточные структуры микроорганизмов, подрывая первичную продуктивность экосистемы.

Производство пластмасс и синтетических волокон сопровождается выбросом стойких органических загрязнителей, таких как полихлорбифенилы (ПХБ). ПХБ характеризуются исключительной химической стабильностью, способностью переноситься на огромные расстояния воздушными массами и накапливаться в жировых тканях животных, вызывая гормональные нарушения и репродуктивную дисфункцию.

Теплоэнергетический комплекс. Тепловые электростанции (ТЭС) оказывают косвенное, но масштабное химическое воздействие. Сжигание ископаемого топлива приводит к выбросу диоксида серы и оксидов азота. В атмосфере эти газы вступают в реакции с водяным паром, образуя серную и азотную кислоты. Выпадая в виде кислотных дождей, они вызывают закисление озер, что ведет к массовой гибели рыбы. Симптоматика поражения, например, у лебедей при сопутствующем загрязнении свинцом, включает паралич мышц шеи («сломанная шея»), что приводит к невозможности питания и смерти. ТЭС также являются источниками шлама и промышленных отходов, которые при неправильном захоронении могут загрязнять подземные горизонты.

Сельское хозяйство как глобальный источник диффузного загрязнения. Сельскохозяйственное производство признано ведущим мировым источником загрязнения вод биогенными элементами (азотом и фосфором) и специфическими агрохимикатами. В отличие от промышленности, сельскохозяйственный сток рассредоточен, что делает его управление крайне сложной задачей.

Механизмы выноса биогенных веществ. Использование минеральных удобрений приводит к накоплению нитратов и фосфатов в почвенном профиле. Эти соединения вымываются поверхностным стоком (во время дождей и снеготаяния) и дренажными системами. Исследования показывают, что содержание нитратов в дренажных водах может достигать 10,18 мг/л, что превышает нормы для рыбохозяйственных водоемов. На мелиорируемых землях сток наиболее активен в период вегетации, а вынос минеральных веществ с осушаемых торфяников может достигать 260 кг на гектар.

Избыток биогенных элементов провоцирует антропогенную эвтрофикацию. Бурное цветение воды, вызванное гиперпродукцией фитопланктона, приводит к дефициту растворенного кислорода (гипоксии) при разложении биомассы, что вызывает массовые заморы рыбы и снижение биоразнообразия. Нитраты также представляют прямую угрозу здоровью человека, являясь причиной метгемоглобинемии у младенцев при попадании в питьевую воду.

Пестициды и животноводческие отходы. Химические средства защиты растений (пестициды) попадают в водоемы в результате смыва или прямого распыления. Многие из

них, особенно хлорорганические пестициды (ХОП), обладают высокой персистентностью и токсичностью для гидробионтов.

Животноводческие комплексы генерируют стоки с колоссальной органической нагрузкой. Показатель биологического потребления кислорода в таких стоках может составлять 250–300 мг, что на порядки выше, чем в естественных водах. Кроме того, отходы животноводства являются источником патогенной микрофлоры и остатков антибиотиков, что способствует развитию антибиотикорезистентности у водных микроорганизмов.

Коммунально-бытовой сектор и «новые» загрязнители. Рост городского населения и изменение структуры потребления выдвинули коммунальные стоки в число приоритетных источников загрязнения. Помимо традиционных органических веществ и поверхностно-активных веществ (ПАВ), в городских стоках обнаруживаются компоненты, которые ранее не учитывались при мониторинге.

Микропластик в гидросфере. Микропластик поступает в сточные воды из множества источников: микросферы из косметики (скрабы, пасты), волокна от стирки синтетических тканей и продукты истирания автомобильных шин. Очистные сооружения задерживают от 78% до 99.9% микропластика, однако из-за колоссальных объемов сбрасываемой воды даже третичная очистка не предотвращает попадание миллионов частиц в водоемы.

Микропластик обладает способностью сорбировать на своей поверхности другие токсиканты — тяжелые металлы, ПАУ и лекарственные препараты. При попадании в организмы гидробионтов микрочастицы вызывают воспалительные процессы, нарушения развития и поведенческие изменения.

Тип полимера	Плотность (г/см ³)	Применение	Поведение в воде
LDPE (ПЭ низкой плотности)	0.91–0.92	Пакеты, пленки	Плавает на поверхности
HDPE (ПЭ высокой плотности)	0.94–0.97	Бутылки для моющих средств	Плавает/Взвешен
PP (Полипропилен)	0.83–0.92	Упаковка еды, детали	Плавает на поверхности
PS (Полистирол)	1.04–1.10	Контейнеры, игрушки	Оседает в толще
PET (ПЭТ)	0.96–1.45	Бутылки для напитков	Быстро оседает на дно
PVC (ПВХ)	1.16–1.58	Трубы, изоляция	Оседает в донные отложения

Таблица 2 - Физико-химические характеристики и экологическая судьба микропластика в зависимости от типа полимера

Фармацевтическое загрязнение. В городских стоках обнаруживается более 500 видов микрозагрязнителей, включая гормональные препараты, антибиотики и психотропные вещества. Эти соединения обладают высокой биологической активностью даже в нанограммовых концентрациях. Присутствие эндокринных деструкторов (например, бисфенола А) ведет к нарушению репродуктивной функции у рыб и изменению соотношения полов в популяциях.

Транспорт и аварийные разливы: динамика нефтяного загрязнения. Водный транспорт и инфраструктура добычи углеводородов являются источниками нефтяного загрязнения, которое признано одним из самых разрушительных для водных экосистем. Ежегодный объем нефти, попадающей в Мировой океан, оценивается в 12 млн тонн.

Трансформация нефти в водной среде. Нефть, попавшая в воду, подвергается стратификации. Хотя растворимость нефтяных углеводородов в целом низка, наиболее

токсичные низкомолекулярные соединения (бензол, толуол) растворяются в воде, представляя серьезную опасность для планктона и икры рыб. Нефтяная пленка на поверхности блокирует газообмен между атмосферой и водой, что приводит к гипоксии. Для фауны воздействие нефти катастрофично: разрушение оперения птиц ведет к их переохлаждению и гибели, а прямое отравление при приеме пищи вызывает массовую смертность.

Региональный аспект: Атырау и Каспийский бассейн. Ситуация в Атырауской области иллюстрирует риски, связанные с добычей нефти на шельфе. Планируемая добыча на северном шельфе Каспия (до 370 тыс. баррелей в сутки) сопряжена с угрозой аварийных разливов в мелководных зонах. Запуск базы реагирования на разливы нефти призван минимизировать ущерб, однако её эффективность ограничена: мощность базы позволяет охватить лишь около 10% площади Каспия.

Дополнительные риски связаны с рекой Урал (Жайык). В периоды нереста осетровых на реке действуют жесткие ограничения на судоходство, что может затруднить выход спасательных судов в случае аварии на море. Кроме того, река Урал испытывает давление от локальных источников — Атырауского НПЗ и прудов-испарителей, таких как «Квадрат», который годами является источником сероводородного загрязнения и токсичных стоков.

Механизмы накопления и воздействия токсикантов на биоту. Понимание опасности загрязнения требует анализа поведения веществ внутри биологических систем. Основными процессами здесь являются биоаккумуляция и биомагнификация.

Биоаккумуляция и биомагнификация. Тяжелые металлы и стойкие органические загрязнители не подвергаются биодegradации. В водных экосистемах уровень концентрации металлов в донных отложениях всегда выше, чем в воде, что делает бентосные организмы (креветки, моллюски) первыми жертвами загрязнения. Моллюски, являясь фильтраторами, выступают идеальными биоиндикаторами — содержание металлов в их тканях репрезентирует экологическое состояние местообитания.

Биомагнификация — это процесс увеличения концентрации токсиканта при переходе от одного трофического уровня к другому. Высшие хищники (крупные рыбы, птицы, млекопитающие) могут накапливать концентрации ядов, в тысячи раз превышающие их содержание в воде. Это приводит к репродуктивной недостаточности, ослаблению иммунной системы и массовой гибели видов, находящихся на вершине пищевой пирамиды.

Комбинированное воздействие и синергизм. В реальных условиях гидробионты подвергаются воздействию «коктейля» из загрязнителей. Синергетический эффект может проявляться в том, что присутствие одного вещества (например, ПАВ) облегчает проникновение в клетку другого токсиканта (тяжелого металла). Кроме того, изменение физических параметров воды (температуры, pH) может переводить металлы из связанных форм в растворенные, резко повышая их биодоступность и токсичность.

Заключение. Анализ источников химического загрязнения показывает, что современная техносфера создала сложную систему распределенных и точечных угроз, которые невозможно нейтрализовать только локальными методами очистки.

Приоритетными направлениями минимизации химической нагрузки на водные экосистемы должны стать:

- Внедрение принципов замкнутого водооборота в промышленности для исключения прямого сброса стоков.
- Переход к прецизионному земледелию и создание водоохраных зон для минимизации диффузного выноса биогенов.
- Модернизация городских очистных сооружений с внедрением систем улавливания микропластика и фармацевтических метаболитов.
- Усиление трансграничного сотрудничества в мониторинге водных объектов, особенно в таких чувствительных регионах, как Каспийское море, где

промышленное освоение шельфа должно сопровождаться строгим соблюдением экологических конвенций.

Химическая безопасность водных экосистем является фундаментом глобальной экологической стабильности, и её обеспечение требует интеграции научных знаний, технологических инноваций и жесткого правового регулирования.

Список использованной литературы:

1. Буренин В. В. Новые конструкции фильтров для очистки сточных вод химических и нефтехимических предприятий // Химическая техника. - 2012. - № 7.
2. Закруткин В. Е., Решетняк О. С. Современный химический состав и тенденции пространственно-временной изменчивости качества речных вод Восточного Донбасса // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. - 2017. - № 2. - С. 101-114.
3. Казгидромет. Антирейтинг водоемов страны. <https://www.inform.kz/ru/gde-v-kazahstane-samie-gryaznie-reki-antireyting-vodoyomov-strani-ea1732>. 15.03.2025.
4. Сафронова Л. А. Проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий // Экологические проблемы промышленных городов / под ред. И. Е. Тихомирова. - Саратов: СГТУ, 2013. - С. 89-92.
5. Овчаренко А. Г., Старыгин В. С. Очистка сточной воды автомоечных станций // Материалы 4 Всеросс. науч.-практ. конф. - Бийск: БТИ, 2011.
6. Ксенофонов Б. С. Проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий // Безопасность жизнедеятельности. - 2011. - № 3.
7. Панова И. М., Найберт И. Флотационная очистка сточных вод, загрязненных нефтепродуктами // Экология производства. - 2011. - № 10.
8. Mateo-Sagasta J. Water Pollution from Agriculture: a Global Review // FAO Report. - 2017.
9. Микропластик в пищевой цепи: невидимая угроза. <https://miin.ru/blog/mikroplastik-v-pishhevoj-czepi-nevidimaya-ugroza-na-tarelke>. 12.01.2025.
10. Идентификация источников нефтяного загрязнения водных объектов // Водные ресурсы. - 2009. - Т. 36, № 1.
11. ЮНЕСКО (UNESCO). Всемирный доклад ООН о состоянии водных ресурсов 2024: Вода для процветания и мира. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2024>. 2024.
12. Биоаккумуляция и биомагнификация токсикантов в пищевых цепях. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7121614/>. 2017.
13. Ефимов В. И. Производство и окружающая среда. - М.: МГГУ, 2012. - 336 с.
14. Достай Ж. Д. Природные воды Казахстана: ресурсы, режим, качество и прогноз. - Алматы, 2012. - 330 с.
15. Сафронова Л. А. Проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий // Экологические проблемы промышленных городов. - Саратов, 2013.
16. Григорьев Ю. С. Методические рекомендации по проведению практических работ по экологии. / Ю. С. Григорьев, И. К. Григорьева. - КГУ, 2002.
17. ПХБ в окружающей среде: риски и последствия. <https://esg-library.mgimo.ru/publications/>. 2024.
18. Биомагнификация в водных экосистемах // ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/384667695>. 2024.
19. МЧС России. Государственный доклад о чрезвычайных ситуациях в 2024 году. <https://mchs.gov.ru/uploads/document/>. 2025.
20. Микропластик в гидросфере: механизмы и последствия. <https://waterservice.kz/blog/art271>. 2025.
21. Emerging contaminants in aquatic ecosystems // IRE Journals. - 2024. - Vol. 17.
22. Thompson R. C. The Detrimental Impacts of Plastic Pollution on Wildlife // Heliyon. - 2023. - № 9(3).

23. Human Pharmaceuticals in the Arctic—A Review // Chemosphere. - 2024. - № 12. - С. 25-30.
24. Разлив нефти в Керченском проливе. <https://tochno.st/materials/>. 10.01.2025.
25. Тюменев С. Д. Водные ресурсы и водообеспеченность территории Казахстана. – Алматы: КазНТУ, 2008. – 267 с.