



UO'K: 543.426:543.62

**ГАЛЛИЙ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ, МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ****GALLIY: EKOLOGIK XATARLAR, ANALIZ USULLARI VA QO'LLANISH ISTIQBOLLARI****GALLIUM: ENVIRONMENTAL RISKS, ANALYTICAL METHODS, AND APPLICATION PROSPECTS****Усманова Хилола Уматалиевна<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Профессор, доктор химических наук, Кафедра общей тактики и оперативного искусства, Университет общественной безопасности Республики Узбекистан, Ташкентская область, Узбекистан

**Сманова Зулайхо Асаналиевна<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>Профессор, доктор химических наук, заведующая кафедрой аналитической химии, факультет химии, Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

**Бобожонов Хикмат Шавкатович<sup>3</sup>**

<sup>3</sup>Главный специалист, кандидат химических наук, Департамент координации специальных операций, Министерство внутренних дел Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

**Аннотация**

Галлий является редким элементом, получающим всё большее значение в современной электронике, солнечной энергетике и оптоэлектронных приборах. В работе рассмотрены геохимические особенности миграции Ga, его возможные экологические риски, связанные с поступлением из промышленных источников, а также современные методы определения в природных и техногенных объектах. Особое внимание уделено перспективам вторичной переработки и утилизации электронных отходов, содержащих Ga, и направлениям его применения в материалах и полупроводниковых технологиях. Отмечается ограниченность токсикологических данных и необходимость дальнейших исследований для оценки воздействия на биоту и человека.

**Annotatsiya**

Galliy zamonaviy elektronika, quyosh energetikasi va optoelektron qurilmalarda tobora katta ahamiyat kasb etayotgan kamyob elementlardan biridir. Ushbu maqolada Ga ning geokimyoviy migratsiya xususiyatlari, sanoat manbalaridan chiqishi bilan bog'liq ekologik xavflari hamda tabiiy va texnogen obyektlarda aniqlashning zamonaviy usullari ko'rib chiqiladi. Shuningdek, galliy saqlovchi elektron chiqindilarni qayta ishlash va utilizatsiya qilish istiqbollari hamda materiallar va yarimo'tkazgich texnologiyalarida qo'llash yo'nalishlariga alohida e'tibor qaratilgan. Toksikologik ma'lumotlarning cheklanganligi va tirik organizmlar hamda inson salomatligiga ta'sirini baholash bo'yicha qo'shimcha tadqiqotlar zarurligi ta'kidlanadi.

**Abstract**

Gallium is a rare element of growing importance in modern electronics, solar energy, and optoelectronic devices. This paper reviews the geochemical features of Ga migration, its environmental risks associated with industrial sources, and the current analytical methods for its determination in natural and anthropogenic objects. Particular attention is given to recycling strategies from electronic waste, remediation approaches, and prospects for applications in advanced materials and semiconductor technologies. The limited toxicological data highlight the need for further studies to assess potential impacts on living organisms and human health.

**Ключевые слова:** галлий, экологические риски, токсичность, геохимия, методы анализа, электроника, переработка отходов, ресурсосбережение

**Kalit so'zlar:** galliy, ekologik xatarlar, toksiklik, geokimyoy, analiz usullari, elektronika, chiqindilarni qayta ishlash, resurslarni tejash

**Key words:** *gallium, environmental risks, toxicity, geochemistry, analytical methods, electronics, waste recycling, resource conservation.*

## ВВЕДЕНИЕ

Галлий относится к числу редких металлов, быстро набирающих значение в электронике и энергетике благодаря уникальным полупроводниковым и оптическим свойствам. В последние десятилетия его использование в интегральных схемах, оптоэлектронике и новых материалах на основе GaAs, GaN и  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> растёт особенно быстро.

Согласно современным данным, в структуре мирового использования доминируют интегральные схемы и микроэлектроника ( $\approx 65$ – $70$  %), около 20 % приходится на оптоэлектронные устройства (светодиоды, лазеры, солнечные элементы), а оставшиеся 10–15 % связаны с применением в специальных сплавах и исследованиях [1]. По статистике USGS, в 2024 г. в США 79 % потребления Ga приходилось на интегральные схемы, 20 % на оптоэлектронику и лишь 1 % на исследования и разработки; при этом  $\approx 99$  % мирового производства первичного галлия обеспечивал Китай [2, 3]. В Европейском союзе галлий официально включён в перечень критических сырьевых материалов (Critical Raw Materials Act, 2024), где подчёркивается его стратегическое значение и установлены целевые показатели: к 2030 г. не менее 10 % потребления должно обеспечиваться добычей в ЕС, 40 % переработкой и 25 % рециркуляцией, при ограничении зависимости от одного поставщика до 65 % [4].

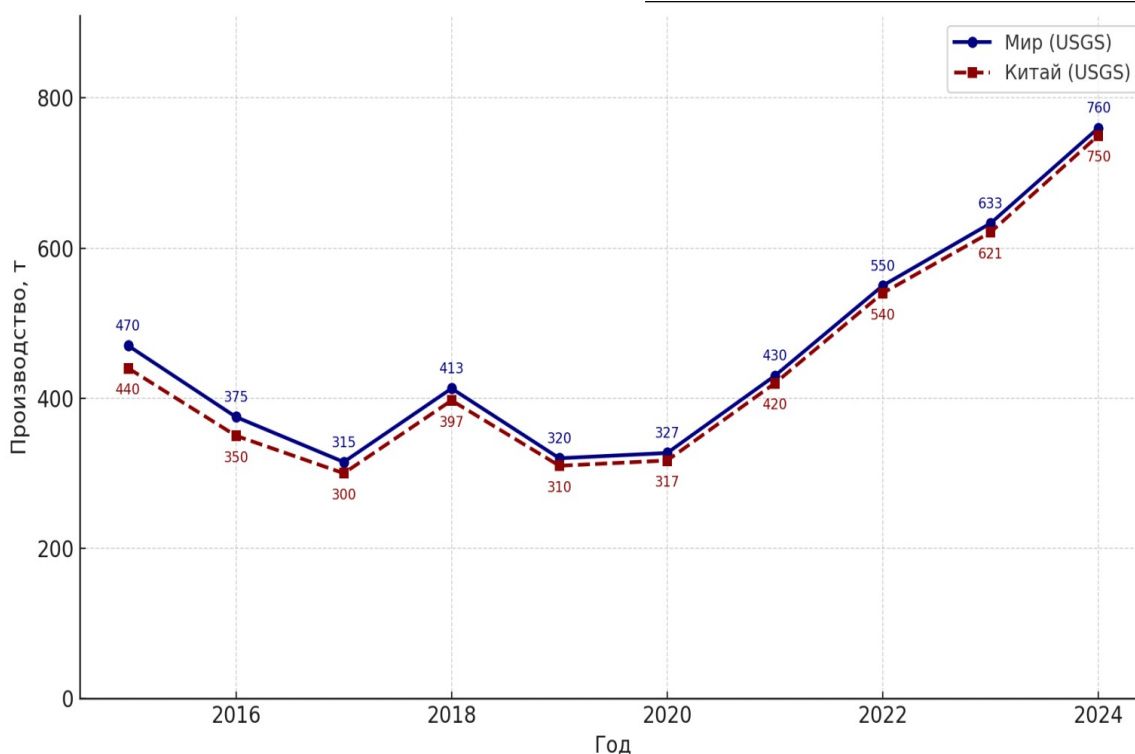
Несмотря на стратегический статус, по сравнению с традиционными токсичными металлами массив данных об экологическом поведении и токсичности Ga остаётся ограниченным. В научной литературе он всё чаще рассматривается как «emerging contaminant» вместе с другими редкими элементами (In, Ge), однако сведения о формах существования, биодоступности и долгосрочных биологических эффектах в природных средах остаются фрагментарными, 2024 [5, 6].

Цель настоящего обзора – систематизировать современные знания о геохимии и источниках поступления Ga, его экологических и токсикологических аспектах, а также аналитических методах и технологиях ресурсосбережения. Такой комплексный формат позволяет соотнести научные и прикладные задачи обращения с Ga с актуальными потребностями промышленности и охраны окружающей среды.

## 2. РЕСУРСЫ И ПРОИЗВОДСТВО ГАЛЛИЯ

Согласно данным Геологической службы США (USGS, 2025 [3]), галлий не образует самостоятельных месторождений и извлекается исключительно как побочный продукт переработки бокситов и цинковых руд [7, 8]. Его ресурсы в земной коре оцениваются примерно в 14,7 млн т, однако промышленно извлекаемая доля составляет лишь около 4 % ( $\approx 610$  тыс. т).

Глобальное производство первичного Ga остаётся на уровне  $<500$  т/год, при этом более 90 % обеспечивается Китаем [2, 4, 9]. Даже при оптимизации технологий верхняя граница добычи оценивается в  $\approx 1374$  т/год, что предполагает возникновение «мягкого» дефицита уже после 2028 г. и «жёсткого» – к середине XXI века [3].



**Рисунок 1.** Динамика мирового и китайского производства низкосортного галлия (2015–2024 гг.)

Как видно из рисунка 1, Китай на протяжении последнего десятилетия обеспечивает более 90 % мирового выпуска галлия: от 93,6 % в 2015 г. до 98,7 % в 2024 г. В 2016–2017 гг. наблюдался спад производства из-за снижения цен, но начиная с 2021 г. выпуск стремительно растёт, что связано с ростом спроса на GaAs и GaN для электроники и оптоэлектроники.

Вторичные источники – переработка отходов GaAs и GaN – формируют заметную часть баланса, однако не способны удовлетворить растущий спрос [10–12]. Технологии «urban mining» и переработки электронной продукции позволяют лишь частично компенсировать дефицит: долгосрочно они могут покрыть не более 60 % потребностей, например, в солнечной энергетике [3, 8].

Новые подходы к ресурсосбережению включают интеграцию гидрометаллургических процессов и биосорбционных методов, что позволяет улучшить селективность и повысить степень извлечения Ga из сложных матриц [13, 14].

### 3. ГЕОХИМИЯ И ПРИРОДНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Ga

#### 3.1. Природное распределение Ga

Галлий (Ga) относится к числу рассеянных элементов литосферы и в свободном состоянии не встречается. Он не образует собственных минералов, а изоморфно входит в алюмосиликаты (бокситы, полевые шпаты, глаукониты) и ассоциирован преимущественно с фазами Al/Fe, реже – с сульфидами Zn и Cu [15, 16].

В гидросфере растворённый Ga присутствует в крайне низких концентрациях. Его вертикальные профили близки к профилям растворённого Al и характеризуются консервативным распределением в океанской воде [17, 18]. В арктических регионах Ga используется как индикатор циркуляции водных масс [19].

Таким образом, природное распределение Ga характеризуется низкими фоновыми содержаниями, тесной ассоциацией с алюмосиликатами и оксидами Al/Fe в литосфере, а также стабильными, но крайне низкими концентрациями в океанской воде [15–19].

#### 3.2. Специцирование и геохимическое поведение Ga

В водной среде ионы  $Ga^{3+}$  легко гидролизуются: при нейтральных и слабощелочных значениях pH доминируют гидроксоформы, включая  $Ga(OH)_4^-$ , тогда как устойчивость отдельных форм определяется как кислотнo-щелочными условиями, так и ионной силой раствора. Существенную роль играет комплексообразование с природными органическими лигандами и растворённым кремнием, которое может как усиливать, так и снижать подвижность и биодоступность элемента [15, 16, 20].

Ключевые механизмы удаления Ga из растворов связаны с сорбцией и копреципитацией на гидроксидах Fe и Al, а также с захватом тонкодисперсными минеральными частицами. В морских системах это обуславливает характерные «псевдонутриентные» профили: минимальные концентрации в поверхностных слоях и рост с глубиной, что связано со скевэнджингом и золотым поступлением железа [16–18].

В условиях континентального выветривания важным фактором является изотопное фракционирование. Для латеритных профилей показано, что лёгкий изотоп  $^{69}Ga$  преимущественно фиксируется в твёрдых фазах, тогда как тяжёлый  $^{71}Ga$  обогащает раствор и переносится в речные системы. Это делает  $\delta^{71}Ga$  перспективным индикатором интенсивности химического выветривания и миграции [16, 20].

В целом, формы и поведение Ga контролируются сочетанием pH, состава твёрдых фаз (гидроксиды Al/Fe), наличия органических лигандов и силикатной матрицы. В природных водах преобладают гидроксокомплексы с заметным вкладом органических и Si-связанных форм, тогда как в почвах и донных отложениях Ga фиксируется в составе оксидов Al/Fe и продуктов выветривания. Эти факторы определяют низкую подвижность элемента, которая может возрастать при подкислении, изменении Eh–pH условий и усилении комплексообразования.

Таким образом, природное распределение и геохимическое поведение Ga характеризуются низкими фоновыми содержаниями, ограниченной подвижностью и преобладанием гидроксокомплексов, стабилизированных органическими и силикатными лигандами. Эти особенности объясняют, почему в естественных условиях Ga редко достигает экологически значимых концентраций и долгое время оставался вне поля системных исследований. Однако рост его применения в электронике, энергетике и биомедицине формирует новые техногенные потоки, которые могут изменять привычные траектории миграции и существенно повышать доступность элемента в окружающей среде. Эти аспекты рассмотрены в следующем разделе, посвящённом современным направлениям использования Ga и основным путям его поступления в природные системы.

#### **4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

##### **4.1. Основные сферы применения**

Современное потребление Ga связано преимущественно с производством полупроводников GaAs и GaN, используемых в микро- и оптоэлектронике, СВЧ-устройствах и фотоэлектрических системах. Перспективными направлениями являются материалы на основе  $\beta-Ga_2O_3$ , демонстрирующие уникальные свойства для силовой электроники и оптики [2, 3, 21, 22]. Дополнительный интерес вызывают биомедицинские применения, включая Ti–Ga сплавы и жидкометаллические системы.

Рост этих сегментов определяет расширение техногенных потоков Ga и актуализирует вопросы их экологической оценки [5].

##### **4.2. Пути поступления**

Современные исследования показывают, что формирование потоков галлия в окружающей среде носит комплексный характер и связано прежде всего с обращением электронных отходов, сточными водами электроники и металлургическими процессами. Наибольшее внимание уделяется переработке электронных отходов (E-waste), где термическая утилизация плат, содержащих арсенид галлия (GaAs), сопровождается выбросами как самого Ga, так и As. При прямом же захоронении этих отходов элементы остаются главным образом в нерастворимой форме, хотя рост объёмов переработки электронного лома усиливает значимость проблемы, учитывая фрагментарность применяемых технологий [8, 10, 12].

Не менее важным направлением являются сточные воды, образующиеся при производстве микроэлектроники. В травильных растворах, СМР-шламах и промывочных стоках фиксируются как растворённые, так и взвешенные формы Ga. Литературные данные систематизируют такие источники и предлагают методы аналитического контроля и ремедиации, что подчёркивает их актуальность для экологического мониторинга [23].

Дополнительным каналом поступления служат металлургические побочные продукты, прежде всего Bayer-ликёр и красный шлам, образующиеся в алюминиевой и цинковой промышленности. Именно в этих потоках Ga концентрируется как примесь, а перспективные направления его извлечения включают гидрометаллургические и биотехнологические методы [7, 13].

Наконец, использование Ga в медицине, включая сплавы Ti–Ga и жидкометаллические системы, формирует новые, хотя пока и ограниченно изученные, микропотоки, попадающие в медицинские сточные воды [21, 22].

Таким образом, в отличие от классических тяжёлых металлов, для Ga не характерны крупные стационарные источники выбросов. Экологические риски связаны главным образом с обращением электронных отходов, сточными водами электроники и побочными потоками металлургических производств, а также с новыми источниками медицинского происхождения. Эти траектории поступления напрямую сопряжены с вопросами экологической доступности и токсичности, которые подробно рассматриваются в следующем разделе.

## **5. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ Ga**

### **5.1. Экологическая доступность и формы в средах**

В природных условиях Ga присутствует преимущественно в виде трёхвалентного катиона ( $Ga^{3+}$ ), склонного к гидролизу и образованию малорастворимых гидроксидов [15, 16]. Концентрации растворённых форм Ga в пресных и морских водах очень низки и контролируются pH, составом твёрдых фаз и наличием органических лигандов. Комплексообразование с гумусовыми веществами и органическими кислотами может существенно увеличивать его миграционную способность и биодоступность.

В биомедицинском контексте обсуждается «Trojan horse»-стратегия: Ga конкурирует с  $Fe^{3+}$  за связывание с биолигандами, что определяет как его антимикробные свойства, так и потенциальное токсическое действие [24, 25].

### **5.2. Токсичность: организмы и человек**

*Микроорганизмы и водные организмы.* Ионы  $Ga^{3+}$  проявляют антимикробное действие, блокируя железозависимые пути метаболизма. При этом острая токсичность для гидробионтов относительно невысока: для *Daphnia magna*  $LC_{50} \approx 15$  мг/л, для водорослей  $EC_{10} > 460$  мкг/л [6]). Для растений систематические данные практически отсутствуют и нередко экстраполируются по аналогии с  $Al^{3+}$  [15].

*Человек и профессиональные риски.* Наибольшую опасность представляют соединения Ga, используемые в полупроводниковой промышленности, прежде всего арсенид галлия (GaAs). Согласно нормативным документам, GaAs обладает канцерогенным и иммунотоксическим потенциалом [26–28]. В то время как  $Ga_2O_3$  демонстрирует более благоприятный токсикологический профиль [29], данные о наноструктурированных формах  $Ga_2O_3$  и новых жидкометаллических системах ограничены. Дополнительный источник риска — переработка и сжигание GaAs-содержащих отходов, сопровождающееся выбросами Ga и As [12].

Современные данные по токсичности Ga остаются фрагментарными. Особенно мало исследований по хроническому низкодозовому воздействию, биоаккумуляции и долгосрочным эффектам новых Ga-содержащих наноматериалов [5, 30].

### **5.3. Нормативно-правовые аспекты**

В отличие от традиционных токсичных элементов (Pb, Cd, Hg, As), для Ga отсутствует комплексная система санитарно-гигиенического нормирования в отношении окружающей среды. Установлены лишь предельные уровни воздействия в воздухе рабочей зоны для GaAs и, реже,  $Ga_2O_3$ , что отражает риски полупроводникового производства [26, 27].

Для металлического Ga и сред вне рабочей зоны (атмосферный воздух, поверхностные и питьевые воды, почвы) нормативные значения, как правило, отсутствуют. На

## EKOLOGIYA

фоне расширяющегося применения жидкометаллических систем и наноструктурированных материалов становится очевидной потребность в стандартизованных токсикологических протоколах и актуализации нормативов [21, 22, 24].

### 6. МЕТОДЫ АНАЛИЗА Ga

Развитие аналитических методов для определения Ga имеет особое значение в связи с его растущим промышленным применением и экологическими рисками. Для корректной оценки воздействия Ga на окружающую среду и здоровье человека необходимы надёжные и чувствительные методы, пригодные как для рутинных исследований, так и для экспрессного *in situ*-мониторинга.

Наиболее распространённые подходы включают спектрофотометрические методы, флуоресцентные сенсоры, атомно-абсорбционную спектрометрию (AAS), масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), а также новые направления – LIBS, DGT, FIA и электрохимические сенсоры [31–45]. Их характеристики и области применения представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Методы анализа и сенсорные технологии для определения Ga<sup>3+</sup>

Метод	Чувствительное звено / реагент	LOD / диапазон	Оптимальные условия	Источник
<b>Спектрофотометрия</b>				
Chrome Azurol S (CAS)	нМ–мкМ	Почвы, растения	pH 4.5–5.5 (ацетатный буфер); Fe <sup>3+</sup> мешает, маскирование цитратом	31]
Фенилфлуорон (экстракционно-фотометрический метод)	М	Природные воды	pH 4.0–4.2; маскирование Fe <sup>3+</sup> (фторид, тиосульфат)	32]
OVAC (органический реагент)	нг уровни	Биологические материалы	Щелочная среда pH 8–9 (аммиачный буфер)	47]
Тиокарбогидразоновые реагенты	нг уровни	Экстракты тканей	pH ≈7.0; контроль Fe <sup>3+</sup> и Al <sup>3+</sup>	48]
Экологичный органический сенсор	10 <sup>-7</sup> М	Вода	Нейтральная среда (pH 7.0–7.5)	46]
<b>Флуоресцентные методы / сенсоры</b>				
Органический реагент (флуориметрия)	10 <sup>-9</sup> –10 <sup>-10</sup> М	Вода	pH 7.4 (фосфатный буфер); интерференция Cu <sup>2+</sup>	34]
Сенсоры на основе шиффовых оснований / красителей	нМ	Вода, модельные растворы	pH 6–8; маскирование Fe <sup>3+</sup> , Al <sup>3+</sup>	35]

Метод	Чувствительное звено / реагент	LOD / диапазон	Оптимальные условия		Источник
Ga-содержащие материалы: «Trojan horse»	—	Биологические среды	Клеточные среды pH ≈7.4	24]	
<b>Электрохимия</b>					
ВА на амальгамных/углеродных электродах	M 10 <sup>-8</sup> –10 <sup>-9</sup>	Природные воды, эко-пробы	pH 4.5–6.0; накопление 60–120 с; полимеры-модификаторы	35]	
Наноматериал-модифицированные электроды	нг/мл	Сточные воды, эко-пробы	pH 2–6; фосфатный буфер	45]	
<b>AAC (ETAAS, GFAAS)</b>					
Slurry-sampling GFAAS	0.02 мг/кг	Почвы	Без кислотного разложения	39]	
Экстракционно-AAS с красителем	мкг/л	Вода	Аммиачный буфер pH ≈9	33]	
<b>ICP-MS</b>					
ICP-MS в сплавах	мкг/г	Ni-сплавы	Полное разложение HNO <sub>3</sub> /HCl/HF	41]	
ICP-MS в фарм. препаратах (урина)	0.1 мкг/л	Биологические жидкости	Разбавление + HNO <sub>3</sub>	41]	
ICP-MS в ферромарганцевых корках	мкг/г	Геологические объекты	Полное разложение HNO <sub>3</sub> +HF	43]	
<b>Новые подходы</b>					
LIBS + машинное обучение	—	Плутониевые матрицы	t° >1000 °C; спектры в вакууме/аргоне	44]	
DGT (diffusive gradients in thin films)	—	Воды, экосистемы	pH 5–7; экспозиция 24–72 ч	16]	
FIA (поточная инъекция)	нМ–мкМ	Вода	pH 6–7; хелатирующие лиганды	16]	

Несмотря на очевидный прогресс в аналитической химии, спектр методов для определения Ga остаётся существенно более ограниченным по сравнению с другими металлами. Это связано с редкостью элемента в природе, отсутствием нормативного регулирования

## EKOLOGIYA

и относительно низким спросом на рутинный экологический мониторинг. Большинство опубликованных работ сосредоточено на применении классических инструментальных техник (ICP-MS, AAS) и отдельных электрохимических или спектрофотометрических подходов.

Сравнительный анализ показывает, что спектрофотометрия остаётся наиболее доступной техникой для экологического анализа природных объектов, хотя её пределы обнаружения ограничены диапазоном  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  М, а результаты зависят от матричных ионов и требуют экстракционных процедур [31].

Флуоресцентные сенсоры обеспечивают пределы обнаружения до  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  М, обладают высокой селективностью и потенциалом для *in situ*-анализа, включая биосреды, но пока нуждаются в валидации на реальных матрицах [34, 24].

Электрохимические методы достигают пределов обнаружения порядка  $10^{-9}$  М, демонстрируют хорошую воспроизводимость и подходят для экспресс-анализа «на месте»; внедрение наноматериалов позволяет отказаться от ртутных электродов, хотя требования к модификации поверхности и возможная интерференция других металлов остаются ограничивающими факторами [35, 45].

AAS надёжна и апробирована для анализа природных и техногенных объектов, обеспечивая чувствительность в диапазоне мкг/л – мг/л, но уступает ICP-MS по пределам обнаружения [33, 36].

ICP-MS на сегодняшний день является наиболее чувствительным и универсальным методом (LOD до 0.1 мкг/л), успешно применяемым для широкого спектра матриц [41–43].

LIBS, FIA, DGT обеспечивают высокую скорость и потенциал для экспресс-анализа, но остаются на стадии становления. LIBS в сочетании с машинным обучением расширяет возможности интерпретации спектров [41], FIA автоматизирует процесс, а DGT позволяет оценивать подвижные формы Ga в водной среде [16].

Таким образом, наиболее перспективным направлением является сочетание традиционных методов (ICP-MS, AAS) с новыми сенсорными технологиями, обеспечивающими экспрессность, селективность и возможность *in situ*-анализа.

## 7. ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЯ

Современные подходы к обращению с галлием во многом связаны с концепцией *urban mining* – переработкой электронных отходов и солнечных батарей, которые становятся важнейшими техногенными источниками металла. В этом направлении активно развиваются гидрометаллургические методы, обеспечивающие комплексное извлечение Ga, Ge и In из многокомпонентных систем [8, 49]. Однако утилизация полупроводниковых материалов на основе GaAs сопряжена с экологическими рисками: при переработке таких отходов возможно высвобождение токсичных соединений, требующее дополнительных мер контроля [12].

Значительные запасы Ga концентрируются также в золе углей и угольных отходах, что делает их важным объектом для извлечения и утилизации. Известны примеры применения химико-микробиологических и гидрометаллургических технологий для селективного выделения Ga [50, 51]. Перспективным направлением остаётся развитие сорбционных технологий: иониты на основе Purolite S-930 [52] и механоактивированный  $\text{TiO}_2$  [53] демонстрируют эффективность в извлечении  $\text{Ga}^{3+}$  даже из многокомпонентных растворов. Дополнительно, создание ион-импринтированных материалов с высокой селективностью в многоионных системах открывает новые возможности для повышения эффективности процессов разделения [54].

Помимо этого, внимание уделяется загрязнению сточных вод, возникающему при использовании Ga в электронной промышленности. Систематизированы источники поступления Ga в водные экосистемы и рассмотрены методы его детекции и ремедиации [23]. На региональном уровне показано, что антропогенный цикл Ga (на примере Китая) формирует значительные техногенные потоки, требующие контроля и оценки экологических рисков [9].

Таким образом, хотя технологии переработки и извлечения Ga интенсивно развиваются, они всё ещё сталкиваются с рядом проблем. Ключевыми из них остаются экологическая безопасность процессов, управление побочными потоками и отсутствие

международных стандартов для оценки потенциального воздействия на окружающую среду. Современные обзоры подчёркивают, что дальнейшее развитие требует комплексного подхода, включающего одновременно технологические инновации и оценку рисков для экосистем [12, 51].

Развитие приборов и функциональных материалов на основе Ga, включая  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  и гибридные системы, открывает широкие перспективы для электроники, энергетики и сенсорных технологий. Однако расширение этих областей неминуемо сопровождается ростом объёмов отходов, содержащих Ga, а также формированием новых техногенных потоков. В связи с этим вопросы эффективного извлечения и повторного использования Ga, а также экологическая безопасность процессов его переработки становятся неотъемлемой частью стратегии устойчивого развития галлиевой отрасли. Эти аспекты рассматриваются в следующем разделе.

### 8. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ Ga В МАТЕРИАЛАХ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений является использование  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  – широкозонного полупроводника с шириной запрещённой зоны  $\approx 4.8\text{--}4.9$  eV, высокой диэлектрической прочностью и устойчивостью к радиации. Эти свойства делают его конкурентоспособным по сравнению с традиционными материалами на основе Si, SiC и GaN [55].

Особое внимание уделяется силовым диодам и транзисторам на основе  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , которые демонстрируют высокую эффективность при больших токах и напряжениях и рассматриваются как компоненты энергетики нового поколения. Ограничивающими факторами остаются низкая теплопроводность и необходимость оптимизации контактных материалов и подложек [55, 57]. Современные исследования направлены на совершенствование технологий эпитаксиального роста, контроль дефектов и управляемое легирование [56].

В целом, развитие  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  и связанных с ним приборов открывает широкие перспективы для силовой электроники, оптоэлектроники и сенсорных технологий. Дальнейший прогресс зависит от решения технологических задач – улучшения теплопроводности, надёжности контактов и интеграции в существующие платформы [55–57].

### 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние десятилетия галлий прошёл путь от редкого и малозначимого элемента до стратегически важного ресурса для высоких технологий. Его уникальные физико-химические свойства обеспечивают высокий спрос в микро- и оптоэлектронике, солнечной энергетике и перспективных материалах на основе  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . Однако рост потребления сопровождается обострением проблем ресурсосбережения, вторичной переработки и экологической безопасности.

Обзор показал, что геохимические особенности миграции Ga во многом сходны с алюминием, но сведения о его биодоступности, биоаккумуляции и токсичности остаются крайне ограниченными. В отличие от традиционных тяжёлых металлов (Pb, Cd, Hg, As), для Ga отсутствуют нормативы качества окружающей среды и системные токсикологические оценки. Этот пробел в знаниях требует приоритетных исследований, направленных на изучение воздействия Ga и его соединений на экосистемы и здоровье человека.

Методическая база анализа Ga постепенно расширяется: применяются спектрофотометрические и электрохимические подходы, атомно-абсорбционная и масс-спектрометрия, активно разрабатываются сенсорные технологии. Тем не менее число апробированных методик и их применение в реальных объектах окружающей среды пока значительно уступают арсеналу, разработанному для других металлов.

Современные исследования уделяют внимание утилизации Ga из электронных отходов, промышленных стоков и угольной золы, что открывает возможности для замыкания антропогенного цикла. Одновременно развитие технологий на основе Ga – от силовой электроники и оптоэлектроники до наноматериалов и жидкометаллических систем – формирует новые экологические вызовы.

## EKOLOGIYA

Таким образом, устойчивое обращение с ресурсами Ga требует согласованных усилий в трёх направлениях:

1. Расширение фундаментальных знаний о его экологическом поведении;
2. Совершенствование аналитических методов, включая перенос лабораторных решений в прикладной мониторинг;
3. Разработка эффективных и экологически безопасных технологий вторичной переработки.

Реализация этих шагов позволит минимизировать экологические риски и обеспечить стратегическую устойчивость высокотехнологичных отраслей, зависящих от поставок и безопасного использования галлия.

## ИСТОЧНИКИ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Larichkin F.D., Cherepovitsyn A.E., Novoseltseva V.D., Goncharova L.I. Sostoyanie i perspektivy rossiyskogo i mirovogo rynka galliya [Status and prospects of the Russian and global gallium market]. *Izvestiya UGGU*. 2017;(4(48)). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-rossiyskogo-i-mirovogo-rynka-galliya> (accessed 18 Aug 2025).
2. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries: Gallium. 2024 edition. Reston, VA: USGS; 2024.
3. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries: Gallium. 2025 edition. Reston, VA: USGS; 2025. <https://doi.org/10.3133/mcs2025>
4. European Commission. Critical raw materials act (CRMA) & 2023 CRM list. Official Journal of the EU. 2024.
5. Yandem G., Jabłońska-Czapla M. Review of indium, gallium, and germanium as emerging contaminants: occurrence, speciation and evaluation of the potential environmental impact. *Arch Environ Prot*. 2024;50(3):84–99. <https://doi.org/10.24425/aep.2024.151688>
6. Batley G.E., Campbell P.G.C. Metal contaminants of emerging concern in aquatic systems. *Environ Chem*. 2022;19(1):23–40. <https://doi.org/10.1071/EN22030>
7. Qu Y., Xu Y., Tang H., Liu H., Liu J. Gallium recovery from bauxite residue: opportunities and challenges. *Minerals*. 2024;14(3):279. <https://doi.org/10.3390/min14030279>
8. Teng Y., Wang C., Liu S., Sun H., Li W., Wang L. Recovery of gallium, indium and germanium from waste solar panels: challenges and perspectives. *Resour Conserv Recycl*. 2025;198:107239. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107239>
9. Jia Y., Chen J., Chen H., et al. Anthropogenic cycle of gallium in China: stocks, flows, and environmental implications. *Resour Conserv Recycl*. 2022;186:106541. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106541>
10. Zheng L., Zhang S., Wang Y., Chen J. Recycling and recovery of gallium from electronic waste: current status and future perspectives. *J Clean Prod*. 2023;383:135438. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135438>
11. Kluczka J. Recovery of gallium from waste LED industry: hydrometallurgical processes and challenges. *Sep Purif Technol*. 2024;320:124004. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124004>
12. Uryu T., Takahashi K., Nishimura T., Yamamoto A. Emission of arsenic and gallium from waste incineration of GaAs-containing materials. *J Mater Cycles Waste Manag*. 2003;5:28–35. <https://doi.org/10.1007/s10163-002-0076-2>
13. Dhiman S., Chandel M., Kumar V., Singh S. Advances in biohydrometallurgy for recovery of gallium and indium: recent developments and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2024;225:107632. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.107632>
14. Jain R., Singh P., Yadav A. Biosorption of gallium(III) by immobilized microbial biomass: mechanistic insights and process optimization. *Bioresour Technol*. 2019;289:121735. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121735>
15. Wood S.A., Samson I.M. The aqueous geochemistry of gallium, germanium, indium and scandium. *Ore Geol Rev*. 2006;28(1):57–102. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.06.002>
16. Yuan W., Gong Y., Chen J., Wang Z., Huang F., Yang X., et al. Gallium isotope constraints on the intense weathering of basalt. *Geochim Cosmochim Acta*. 2022;333:22–38. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.06.042>
17. Orians K.J., Bruland K.W. The biogeochemistry of gallium in the Pacific Ocean. *Geochim Cosmochim Acta*. 1988;52:2955–2962. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90163-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90163-6)
18. Shiller A.M., Bairamadgi S., Santschi P.H. Dissolved gallium in rivers and estuaries: tracer of input and removal processes. *Mar Chem*. 2006;100:114–123. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2005.11.001>
19. Whitmore L.M., Cullen J.T., Lippiatt S.M. Distribution of dissolved gallium in the Arctic Ocean: tracer of Pacific inflow. *Mar Chem*. 2020;227:103891. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2020.103891>
20. Zhang J. Gallium isotope effect of Ga–Si complex solutions in water: theoretical study based on density functional theory. *Water*. 2024;16(12):1680. <https://doi.org/10.3390/w16121680>
21. Liu Y., Chen J., Yang J., Chen J., Hao Q., Guo J., et al. Gallium-based nano-liquid metals enabled antimicrobial mechanisms and biomedical applications. *Nanoscale*. 2025;17(24):14441–14457. <https://doi.org/10.1039/D5NR00406C>
22. Huang T., Huang S., Liu D., Zhu W., Wu Q., Chen L., et al. Recent advances and progress on the design, fabrication and biomedical applications of gallium liquid metals-based functional materials. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2024;238:113888. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2024.113888>
23. Wang T., Zhao Y., Zhang L. Gallium in wastewater: sources, detection, and treatment technologies. *J Hazard Mater*. 2022;425:127960. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127960>

24. Sun W., Qi M., Cheng S.-S., Li C., Dong B., Wang L., et al. Gallium and gallium compounds: new insights into the “Trojan horse” strategy in medical applications. *Mater Des.* 2023;227:111704. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111704>
25. Chitambar C.R. Medical applications and toxicities of gallium compounds. *Int J Environ Res Public Health.* 2010;7(5):2337–2361. <https://doi.org/10.3390/ijerph7052337>
26. NIOSH. Criteria for a recommended standard: occupational exposure to gallium arsenide. DHHS (NIOSH) Publication No. 2016-128. Cincinnati: NIOSH; 2016.
27. ECHA. Gallium arsenide – classification & labelling (CLP). European Chemicals Agency; 2020.
28. White S.J.O., Shine J.P. Exposure potential and health impacts of indium and gallium, metals critical to emerging electronics and energy technologies. *Curr Environ Health Rep.* 2016;3(4):459–467. <https://doi.org/10.1007/s40572-016-0118-8>
29. Bomhard E.M. The toxicology of gallium oxide in comparison with gallium arsenide and indium oxide. *Environ Toxicol Pharmacol.* 2020;80:103437. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103437>
30. de Assis A.C.J., Pegoraro G.M., Duarte I.S. Evolution of gallium applications in medicine and microbiology: a chronology. *Biomaterials.* 2022;35:675–688. <https://doi.org/10.1007/s10534-022-00406-4>
31. Potedniok J., Orzeł J., Gałeczka J., Czoik R. A highly sensitive spectrophotometric method for gallium determination with chrome azurol S in the presence of mixed cationic–nonionic surfactants and its application in plant analysis. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 2017;48(8):936–942. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1311907>
32. Dzherayan T.G., Shkinev V.M., Reznik A.M., Mitronov A.N., Karandashev V.K. Extraction-photometric determination of gallium with phenylfluorone in alkaline carbonate solutions in the presence of polyethylene glycol. *J Anal Chem.* 2006;61:566–570. <https://doi.org/10.1134/S1061934806060098>
33. Pashadzhanov A., Bayramov S., Abbasova G., Agamalieva M., Mamedova Z. Extraction–atomic absorption determination of gallium(III) with 2-hydroxy-5-t-butylphenol-4'-methoxyazobenzene. *J Mater Sci Chem Eng.* 2020;8:24–30. <https://doi.org/10.4236/msce.2020.89003>
34. Kara D., Fisher A., Foulkes M., Hill S.J. Determination of gallium at trace levels using a spectrofluorimetric method in synthetic U–Ga and Ga–As solutions. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 2010;75(1):361–365. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2009.10.041>
35. Pysarevska S., Dubenska L. Advances in the electrochemical determination of gallium(III). *Chem Met Alloys.* 2018;11:34–41. <https://doi.org/10.30970/cma11.0370>
36. Bobojonov, K., Usmanova, K., Smanova, Z., Gafurova, D., & Abdullayeva, M. (2025). Analytical application of sorption–fluorescence methods for the determination of aluminium, beryllium, and lead in environmental samples. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/03067319.2025.2511983>
37. Yakhshieva Z.Z., Usmanova Kh.U., Zhuraev Kh.B., Akhmadjonova Yo.T., Umarov F.A., Karabaeva G.B. Development of methods for the determination of aluminium in water. *Journal of Survey in Fisheries Sciences.* 2023;10(2S):3322–3337. Available at: <https://sifisheressciences.com/index.php/journal/issue/view/21>
38. Bobojonov Kh.Sh., Usmanova Kh.U., Smanova Z.A. Galliy va alyuminiy ionlarini lyuminescent usulda aniqlashda qo'llaniladigan organik reagentlarni immobilizlash [Immobilization of organic reagents for luminescent determination of gallium and aluminium ions]. *FarDU ilmiy xabarlarlari – Sci J Fergana State Univ.* 2024;30(4):44–49. [https://doi.org/10.56292/SJFSU/vol30\\_iss4/a95](https://doi.org/10.56292/SJFSU/vol30_iss4/a95)
39. X.U. Usmanova, X.Sh. Bobojonov, U.U. Ruzmetov, Z.A. Smanova. Чувствительные слои оптических сенсоров для мониторинга объектов окружающей среды на тяжелые металлы // *Узбекский химический журнал.* – 2025. – №3. – С.144-158.
40. Langødegård M., Wibetoe G. Determination of gallium in soil by slurry-sampling GFAAS. *Anal Bioanal Chem.* 2002;373(8):820–826. <https://doi.org/10.1007/s00216-002-1365-0>
41. Yakimovich P.V., Alekseev A.V. Determination of gallium, germanium, arsenic and selenium in heat-resistant nickel alloys microalloyed with REM by ICP-MS. *Trudy VIAM.* 2015;(3). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-galliya-germaniya-myshyaka-i-selena-v-zharoprochnyh-nikelevyh-splavah-mikrolegirovannyh-rzm-metodom-isp-ms>
42. Filatova D.G., Seregina I.F., Foteeva L.S., Pukhov V.V., Timerbaev A.R., Bolshov M.A. Determination of gallium originated from a gallium-based anticancer drug in human urine using ICP-MS. *Anal Bioanal Chem.* 2011;400(3):709–714. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-4791-z>
43. Blokhin M.G., Zarubina N.V., Mikhailyk P.E. Inductively coupled plasma mass spectrometric measurement of gallium in ferromanganese crusts from the Sea of Japan. *J Anal Chem.* 2014;69:1237–1244. <https://doi.org/10.1134/S1061934814130036>
44. Vu D.M., Auxier II J.D., Judge E.J., Aldrich K.E., Gifford B.J., Saumon D., et al. A data analysis method to rapidly characterize gallium concentration in plutonium matrices using LIBS. *Spectrochim Acta B.* 2023;203:106650. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2023.106650>
45. El-Fatah G.A., Magar H.S., Hassan R.Y.A., et al. A novel gallium oxide nanoparticles-based sensor for the simultaneous electrochemical detection of Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> and Hg<sup>2+</sup> ions in real water samples. *Sci Rep.* 2022;12:20181. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24558-y>
46. Aljabri D.M., El-Bahy M.S., El-Sayed R., Debbabi K.F., Amin A.S., Mohamed N.M. An innovative eco-friendly optical sensor designed specifically to detect gallium ions in environmental samples. *Sens Bio-Sens Res.* 2024;46:100687. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2024.100687>
47. Lucena R.B., Morales E., Gomez-Ariza J.L. Spectrophotometric determination of gallium in biological materials at nanogram levels with thiocarbohydrazone derivatives. *Farmaco.* 1994;49(4):291–295. PMID: 8049011.

## EKOLOGIYA

48. J. Chem. Soc., Anal. Commun. Spectrophotometric determination of gallium with thiocarbohydrazone derivatives. *J Chem Soc Anal Commun*. 1992;70:761–764. <https://doi.org/10.1039/JA9920700761>
49. Koltsov V.B., Larionov N.M., Slesarev S.A., Barkinkhoeva T.A. Separation of gallium from a multicomponent eutectic during recycling of technological wastes. *Izvestiya VUZov. Elektronika*. 2016;(6). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vydelenie-galliya-iz-mnogokomponentnoy-evtektiki-pri-utilizatsii-tehnologicheskikh-otvodov>
50. Blayda I.A., Vasil'eva T.V., Slyusarenko L.I., Khitrich V.F. Behavior of germanium and gallium during processing of coal fly ash by chemical and microbiological methods. *Izvestiya VUZov. Khimiya i Khim Tekhnol*. 2014;(1). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povedenie-germaniya-i-galliya-pri-pererabotke-zoly-ot-szhiganiya-ugley-himicheskimi-i-mikrobiologicheskimi-metodami>
51. Qu Y., Rudnick E. Review on gallium in coal and coal waste materials: exploring strategies for hydrometallurgical metal recovery. *Molecules*. 2024;29(24):5919. <https://doi.org/10.3390/molecules29245919>
52. Lukisha T.V., Adeeva L.N., Borbat V.F. Kinetics of Ga(III) sorption from HCl solutions by chelating resin Purolite S-930. *Vestnik OmGU*. 2013;2(68). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-kinetiki-sorbtsii-ionov-galliya-iz-solyanokislyh-rastvorov-helatnoy-smoloy-purolite-s-930>
53. Pechishcheva N.V., Korobitsyna A.D., Melchakova O.V. Features of gallium sorption on mechanochemically activated titanium dioxide. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2020;3–4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-sorbtsii-galliya-na-mehanoaktivirovannom-dioksidi-titana>
54. Chai N., Gao L., Li S., Cao Y., Ma Z., Li L., Hu M. Insight into the gallium selectivity mechanism of in-situ ion-imprinted material in multi-ion systems. *Miner Eng*. 2023;194:108133. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108133>
55. Pearton S.J., Ren F., Tadjer M., Kim J. Perspective: Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for ultra-high power rectifiers and MOSFETs. *J Appl Phys*. 2018;124(22):220901. <https://doi.org/10.1063/1.5062841>
56. Higashiwaki M., Kamimura T. β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> power devices: status, prospects and future challenges. *Semicond Sci Technol*. 2024;39(4):043001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ad2f43>
57. Ahmadi E., Oshima Y. Materials issues and devices of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J Appl Phys*. 2019;126(16):160901. <https://doi.org/10.1063/1.5115323>