

Плацента как биомаркер экологической ситуации: результаты микроминерального анализа в Акмолинской области

Ардак Ержанова¹, Ерик Меркибаев^{2*}, Сауле Нурмакова², Ерлан Жумай¹, Ануар Ахметжан³, Алина Еркинқызы³, Акмарал Ниязова²

¹Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан; erlanzhumai@gmail.com

²Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, Алматы, Казахстан; ar.yerzhanova@satbayev.university; Niyazova.akma@mail.ru

³Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфандиярова, Алматы, Казахстан; akhmetzhan@rambler.ru; Dr_yerkinovna@mail.ru

*Корреспонденция: y.merkibayev@satbayev.university

Цитирование: Ержанова, А., Меркибаев, Е., Нурмакова, С., Жумай, Е., Еркинқызы, А., Ниязова, А. (2025). Плацента как биомаркер экологической ситуации: результаты микроминерального анализа в Акмолинской области. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 152(3), 191-206.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-192-207>

Академический редактор:
Ж.Г. Берденов

Поступила: 09.09.2025
Исправлена: 17.09.2025
Принята: 19.09.2025
Опубликована: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация: В статье представлены результаты комплексного исследования микроминерального состава плацент жительниц Акмолинской области, региона, характеризующегося повышенной радиоэкологической напряжённостью, связанной с интенсивной добычей урана и золота, а также с наличием природных радоновых аномалий. Основной целью исследования стало выявление особенностей накопления и распределения минеральных фаз в плацентарной ткани, что позволило оценить влияние эколого-геохимических факторов на систему «мать–плацента–плод».

Методическая база включала использование сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Hitachi S-3400N) и энергодисперсионной спектроскопии (Bruker XFlash 5010), что обеспечило высокую точность при определении морфологии и химического состава минеральных включений. В ходе анализа образцов плацент женщин, проживающих в Акмолинской области, было установлено наличие солей калия и хлора, сопровождающихся примесями натрия и алюминия. Кроме того, были зафиксированы фосфорсодержащие фазы двух типов: P–Na и P–Ca, которые играют ключевую роль в процессах кальцификации плацентарной ткани и могут быть связаны с формированием патологических кальцинатов. Особый интерес вызвало обнаружение редкой ассоциации I–Cu-частиц, ранее не описанной в плацентарных структурах. Этот факт напрямую отражает специфическое геохимическое состояние исследуемого региона и подтверждает возможность накопления в плаценте маркерных элементов, связанных с техногенным и природным загрязнением.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что плацента может рассматриваться не только как орган, обеспечивающий жизнедеятельность плода, но и как биоиндикатор состояния

окружающей среды. Наличие специфических минеральных фаз отражает реальную эколого-геохимическую ситуацию и её потенциальное воздействие на репродуктивное здоровье женщин. Результаты подчёркивают необходимость дальнейших междисциплинарных исследований и разработки профилактических мероприятий, направленных на снижение риска осложнений беременности и охрану здоровья новорождённых.

Ключевые слова: плацента; Акмолинская область; микроэлементы; сканирующая электронная микроскопия; энергодисперсионный анализ; эколого-геохимическая ситуация; кальцинаты; здоровье матери и ребёнка.

1. Введение

Современные экологические условия в ряде регионов Казахстана, включая Акмолинскую область, характеризуются высоким уровнем антропогенного и техногенного воздействия, связанным с добычей полезных ископаемых, промышленной деятельностью, урбанизацией и изменением природного ландшафта. На территории области функционируют золотодобывающие и урановые предприятия, чья деятельность сопровождается выбросами тяжёлых металлов и радионуклидов в окружающую среду (Alimzhanova, 2021; Zhumabekova, 2022). В результате происходит накопление токсикантов в природных средах (почва, воздух, вода), что формирует неблагоприятные факторы риска для здоровья населения и деградацию локальных экосистем (Sharipova, 2020).

Особенно уязвимой к воздействию экологических и геохимических нагрузок является система «мать–плацента–плод», которая представляет собой сложный биологический комплекс, обеспечивающий не только питание и дыхание плода, но и его полноценное развитие на протяжении всего периода гестации. Плацента выполняет целый спектр жизненно важных функций: барьерную - защищая плод от проникновения значительной части токсинов и патогенов; трофическую - обеспечивая транспорт кислорода, воды, макро- и микроэлементов, необходимых для роста и созревания тканей; эндокринную - синтезируя гормоны, регулирующие течение беременности и развитие плода; иммунорегуляторную - формируя толерантность к генетически чужеродному организму и предотвращая иммунное отторжение.

Вместе с тем плацента является динамичным органом, способным аккумулировать широкий спектр химических элементов, включая как эссенциальные (кальций, магний, йод, цинк, селен), так и токсичные (свинец, кадмий, ртуть, радионуклиды). Такой двойственный характер делает её одновременно защитным фильтром и «биологическим архивом», в котором отражается не только состояние организма матери, но и уровень экологической напряжённости региона проживания. Нарушение её функций или дисбаланс элементного состава может напрямую сказываться на здоровье матери и ребёнка, способствуя возникновению осложнений беременности и формированию долгосрочных патологий у новорождённого.

Плацента выступает уникальным индикаторным органом, по которому можно судить о совокупном влиянии внешней среды на систему «мать–плод». Её исследование позволяет не только оценить биологические риски, но и выявить маркерные признаки экологической нагрузки, что делает анализ плацентарных тканей важнейшим инструментом для медицинской экологии и репродуктивной медицины (Lugovaaya, 2002; Lugovaaya, 2014).

Влияние тяжёлых металлов, радионуклидов и дефицита жизненно необходимых микроэлементов на здоровье матери и ребёнка является научно доказанным и подтверждено многочисленными клинико-эпидемиологическими и экспериментальными исследованиями. Плацента, выполняя ключевую барьерную и трофическую функции, должна обеспечивать защиту плода от токсических агентов и одновременно снабжать его необходимыми питательными

веществами. Однако при неблагоприятной экологической ситуации её барьерная способность может быть нарушена, что ведёт к накоплению в плацентарной ткани токсичных элементов — свинца, кадмия, ртути, урана и других радионуклидов.

Нарушение микроэлементного гомеостаза и дефицит таких элементов, как цинк, медь, селен и йод, в сочетании с воздействием тяжёлых металлов создают условия для сложных метаболических и эндокринных сбоев. Это отражается как на состоянии беременной женщины, так и на развитии плода. Доказано, что избыток тяжёлых металлов способен вызывать оксидативный стресс, повреждение ДНК и эпигенетические изменения, которые закладывают основу для долгосрочных патологических состояний у ребёнка, включая снижение когнитивных функций и предрасположенность к хроническим заболеваниям в будущем.

На клиническом уровне такие нарушения проявляются в виде осложнений беременности: преэклампсии, задержки роста плода, невынашивания беременности и повышенной частоты самопроизвольных аборт. Тяжёлые металлы и радионуклиды нарушают формирование сосудистой сети плаценты, ухудшают транспорт кислорода и питательных веществ, что способствует внутриутробной гипоксии. В результате возрастает риск преждевременных родов, низкой массы тела при рождении и врождённых аномалий развития.

Особую тревогу вызывает рост показателей материнской и младенческой смертности в регионах с неблагоприятной экологической обстановкой. Нарушения микроэлементного состава плаценты могут не только повышать вероятность летальных исходов в перинатальном периоде, но и оказывать межпоколенческое воздействие, отражающееся на здоровье будущих поколений. В совокупности эти факторы подчеркивают необходимость комплексного мониторинга элементного статуса беременных женщин, разработки программ по коррекции микроэлементного дефицита и строгого контроля за содержанием токсичных веществ в окружающей среде (Badri, 2018; Robert, 2011).

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), около 25% всех заболеваний человека имеют экологически обусловленную природу (Fenger, 2016; Gude, 2004). Для женщин репродуктивного возраста это особенно критично, поскольку токсикантные элементы, поступающие с воздухом, водой и продуктами питания, способны мигрировать через плацентарный барьер и воздействовать на плод. Таким образом, плацента выступает не только как орган жизнеобеспечения, но и как биомаркер интегрального воздействия экологических факторов.

В условиях Казахстана экологическая нагрузка усугубляется демографическими особенностями региона. В последние десятилетия фиксируется снижение рождаемости, что связано как с социально-экономическими факторами, так и с ухудшением репродуктивного здоровья женщин (Gorbatko, 1999; World Health Organization, 2021). Несмотря на общий рост социального уровня жизни, в ряде областей страны коэффициент рождаемости остаётся стабильным и невысоким. Улучшение демографических показателей во многом объясняется миграционными процессами, а не внутренними улучшениями репродуктивного потенциала.

Согласно Целям устойчивого развития (ЦУР 3 «Здоровье и благополучие»), демографические показатели – уровень младенческой смертности, продолжительность жизни и рождаемость – являются ключевыми индикаторами состояния здоровья населения. Именно поэтому изучение репродуктивного здоровья в экологически неблагополучных регионах имеет стратегическое значение.

Акмолинская область отличается высокой радиоэкологической напряжённостью, обусловленной наличием урановых и золотодобывающих предприятий, а также природных радоновых аномалий. Различия в радиационном фоне, химическом составе подземных вод и геохимии почв создают неоднородные условия, которые могут оказывать непосредственное

влияние на здоровье населения, особенно женщин репродуктивного возраста (Akhmetzhanov, 2022; Desforges, 2010; Pacifici, 1995).

До настоящего времени данные о микроминеральных фазах и элементном составе плаценты жительниц региона в условиях радиоэкологической нагрузки практически отсутствуют. Это делает исследования в данной области крайне актуальными, так как они позволяют оценить барьерные функции плаценты, выявить особенности накопления микроэлементов и токсикантов, а также определить риски для здоровья матери и ребёнка.

Изучение элементного состава биологических субстратов, таких, как волосы, кровь, плацента и молочные зубы, в последние десятилетия стало одним из ключевых направлений биомедицинских и экологических исследований. Эти ткани и жидкости рассматриваются как своеобразные «архивы» метаболических процессов, происходящих в организме, и одновременно как чувствительные индикаторы состояния окружающей среды. Благодаря высокой информативности и относительной доступности для отбора образцов, данные субстраты позволяют выявлять скрытые формы микроэлементного дисбаланса и устанавливать взаимосвязь между экологическими факторами и состоянием здоровья человека.

Результаты многочисленных международных исследований демонстрируют значительные различия в накоплении макро- и микроэлементов у населения разных регионов, что напрямую связано с геохимическими особенностями территории, уровнем промышленной нагрузки, качеством питьевой воды и рационом питания. Например, дефицит или, наоборот, избыточное содержание определённых элементов в геосреде приводит к формированию эндемических зон с повышенным риском развития различных патологий. В этой связи особое внимание уделяется йоду и селену - элементам, играющим важную роль в эндокринной регуляции и антиоксидантной защите организма.

Йододефицит по-прежнему остаётся глобальной медико-социальной проблемой: он характерен не только для горных и внутриконтинентальных территорий, но и встречается в странах с развитой системой здравоохранения. Недостаток йода у беременных женщин может вызывать гипотиреоз у матери и плода, задержку внутриутробного развития, врождённые аномалии и стойкие когнитивные нарушения у ребёнка. Селен, в свою очередь, является ключевым компонентом ферментов антиоксидантной системы (глутатионпероксидазы, тиоредоксинредуктазы), и его недостаток усугубляет воздействие окислительного стресса, снижает иммунную защиту и повышает уязвимость к инфекциям.

Особенно тревожным является тот факт, что дефицит йода и селена нередко встречается одновременно, усиливая негативные эффекты друг друга. Такая комбинация может приводить к сложным эндокринным нарушениям, серьёзным осложнениям беременности и даже к межпоколенческому влиянию на здоровье потомства. В связи с этим изучение элементного состава биологических субстратов беременных женщин и новорождённых приобретает не только академическое, но и практическое значение: полученные данные служат основанием для разработки профилактических программ, коррекции питания и реализации целевых медико-санитарных мероприятий на региональном и национальном уровнях.

Таким образом, исследование элементного статуса организма с использованием волос, крови, плаценты и молочных зубов представляет собой мощный инструмент оценки как индивидуального, так и популяционного здоровья. Эти данные позволяют прогнозировать риски, разрабатывать стратегии по снижению неблагоприятных воздействий и формировать более точные рекомендации для сохранения репродуктивного и общественного здоровья (Zhumabekova, 2022).

Проведение данного исследования имеет ряд преимуществ: оно позволит оценить барьерные свойства плаценты в условиях радиационной и техногенной нагрузки; выявить региональные особенности накопления микро- и макроэлементов; сопоставить полученные

результаты с международными данными (Eshkoli, 2011) разработать научно обоснованные рекомендации для системы здравоохранения региона.

Результаты исследования могут быть использованы в акушерско-гинекологической практике, в программах охраны здоровья матери и ребёнка, а также в государственной политике, связанной с экологической безопасностью и демографическим развитием. Кроме того, плацента как биоиндикатор может стать ценным инструментом для мониторинга влияния экологических факторов на здоровье населения в долгосрочной перспективе (Mikelson, 2015; Savchenko, 2016).

2. Материалы и методы

Для проведения исследования был применён комплекс современных инструментальных методов, включающих сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) на приборе Hitachi S-3400N и рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) с использованием энергодисперсионного спектрометра Bruker XFlash 5010. Такой методический подход позволил объединить морфологическое изучение плацентарной ткани с количественно-качественной оценкой элементного состава микроминеральных фаз.

Исходным материалом послужили плацентарные ткани жительниц Акмолинской области, полученные в раннем послеродовом периоде. Для анализа была сформирована серия сухих образцов плаценты. Подготовка включала следующие этапы: Сушка материала – фрагменты плацентарной ткани высушивались при комнатной температуре в условиях естественной вентиляции до постоянной массы. Механическая подготовка – высушенные образцы подвергались измельчению до порошкообразного состояния с целью увеличения площади поверхности и повышения однородности пробы. Нанесение на подложку – измельчённые частицы равномерно распределялись по углеродной проводящей ленте, закреплённой на предметном столике микроскопа. Удаление загрязнений – препараты дополнительно обдувались сжатым воздухом для удаления пылевых и свободных частиц, способных исказить результаты анализа. Напыление проводящего слоя – образцы подвергались вакуумному напылению тонкого слоя золота-платины (Au–Pt) с целью предотвращения зарядки поверхности и обеспечения стабильности электронного пучка при микроскопии.

СЭМ-исследование проводилось при ускоряющем напряжении 15–20 кВ, что обеспечивало достаточную глубину проникновения электронов и высокое пространственное разрешение. Для каждой пробы фиксировались: морфология поверхностей; структура и размеры микрочастиц; особенности распределения минеральных включений в матриксе плацентарной ткани.

Использование вторичных и обратно рассеянных электронов позволило получить как топографические, так и контрастные по атомному номеру изображения, что облегчало идентификацию фаз с различным атомным весом.

Для количественного и качественного определения химического состава фаз был применён энергодисперсионный спектрометр Bruker XFlash 5010. Запись спектров осуществлялась в диапазоне энергий 0–20 кэВ с временной экспозицией, достаточной для накопления статистически достоверных данных.

Особое внимание уделялось следующим аспектам: определение макроэлементов (Ca, K, Na, Mg), участвующих в обменных процессах; выявление микроэлементов (Fe, Zn, Cu, Mn), необходимых для биологических функций; фиксация токсикантов (Pb, Cd, U, As), отражающих экологическую нагрузку региона; сравнительный анализ распределения элементов в различных зонах одной и той же пробы.

Для повышения достоверности результатов использовались следующие подходы: проведение повторных измерений на разных участках одной и той же пробы; использование стандартных образцов для калибровки прибора; сопоставление данных СЭМ и РСМА для исключения ошибок интерпретации.

Таким образом, сочетание СЭМ и рентгеноспектрального микроанализа позволило комплексно оценить как морфологические характеристики плацентарной ткани, так и её элементный состав, включая выявление микроминеральных фаз и локальных участков накопления токсикантов. Такой подход обеспечивает высокий уровень точности и воспроизводимости, что делает результаты исследования сопоставимыми с международными данными и применимыми для медико-экологических выводов.

Для исследований использовалась расширенная выборка и контрольные серии образцов плаценты и пупочной крови, а также материалы картирования (EDS-mapping) для оценки распределения на территории Акмолинской области техногенных геохимических загрязняющих веществ.

Напыление Au–Pt порождала соответствующие пики на ЭДС-спектрах; при интерпретации они исключались. Сухая подготовка усиливала кристаллизационные свойства солей (KCl/NaCl).

3. Результаты

Микроминеральный состав плацентарной ткани изучен на базе МИНОЦа «Урановая геология» при Научно-исследовательском Томском политехническом университете, на приборах СЭМ Hitachi S-3400N с использованием детектора обратно-рассеянных электронов (BSE, высоковакуумный режим). Элементный анализ выполнен энергодисперсионной спектрометрией (Bruker XFlash 5010). На сухие образцы исходного материала наносили препараты на углеродную ленту, обдувая сжатым воздухом с последующим золото-платиновым напылением, что учитывалось при интерпретации спектров.

На Рисунках 1, 2 представлены BSE-изображения биоптанта плаценты, где в качестве основного фона показаны многочисленные частицы солевого состава с доминированием калия и хлора, а в меньшей степени долей натрия (K, Na–Cl) с локальными примесями лёгких металлов (например, Al).

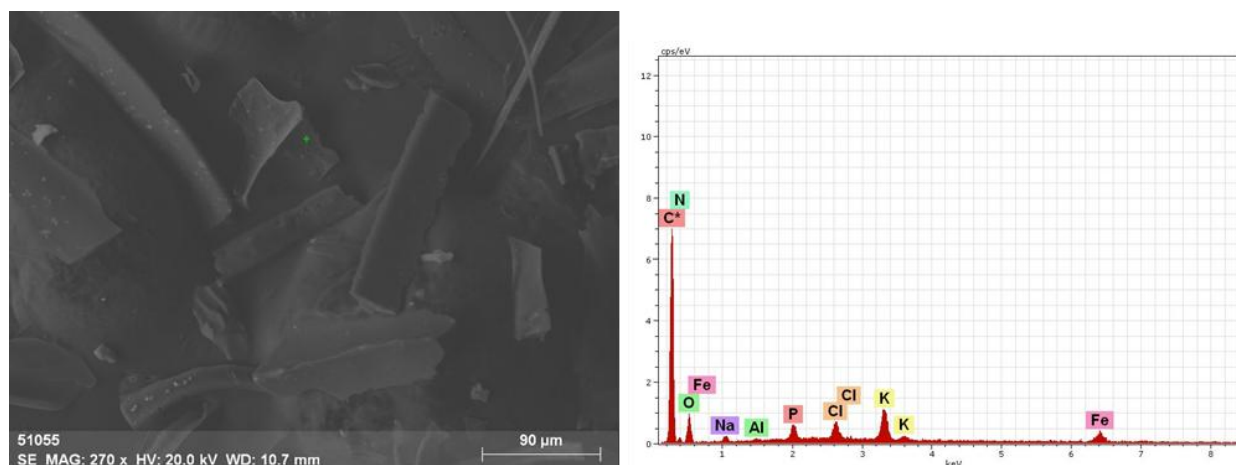


Рисунок 1. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр элементов в составе плаценты жительницы Акмолинской области

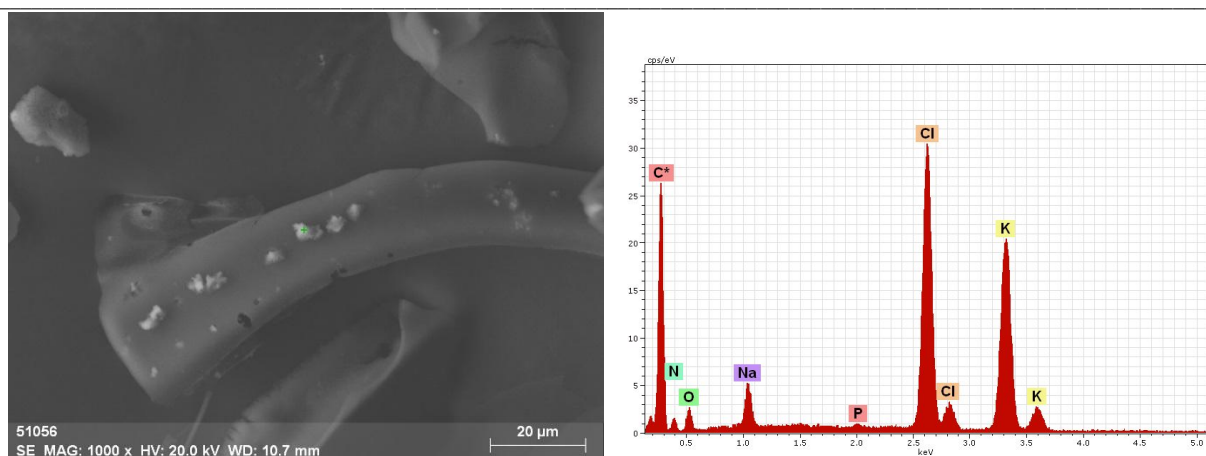


Рисунок 2. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частиц K-Cl, содержащихся в составе плаценты жительницы Акмолинской области

Как видно из Рисунков 1 и 2, солевые частицы встречаются достаточно часто, что является важным наблюдением, поскольку это подтверждает включение калия и хлора в состав плацентарной ткани, при меньшем содержании натрия. Такой результат отражает способность плаценты аккумулировать ионные формы элементов, циркулирующих в организме матери и поступающих из внешней среды.

Морфология выявленных частиц варьирует от изометричных до пластинчатых агрегатов. Форма и структура указывают на кристаллизацию солевых фаз в условиях ограниченного пространства и переменной влажности. Контраст в режиме BSE (back-scattered electrons) демонстрирует сравнительно низкое среднее атомарное число, что согласуется с принадлежностью частиц к галогенидам щелочных элементов, преимущественно калия и натрия.

В большинстве проанализированных полей зрения K-содержащие фазы статистически преобладают над Na-содержащими, что подтверждается стабильным присутствием спектральных пиков K-K α и Cl-K α , а также переменной интенсивностью Na-K α (Рисунки 2–5). Данный результат указывает на избыточное накопление калийсодержащих соединений в тканях плаценты по сравнению с натриевыми аналогами.

Солевые частицы, часто встречающиеся в плаценте жительниц Акмолинской области, демонстрируют не только различия в морфологии, но и разнообразие в химическом составе. На рисунке 3 фиксируется наличие примесей натрия, фосфора и алюминия, что может указывать на включение комплексных фосфатных соединений. На рисунке 4 отчётливо выделяются примеси натрия и фосфора, подтверждая гипотезу о взаимодействии солевых фаз с фосфатными комплексами. Таким образом, плацента может рассматриваться как естественный сорбционный барьер, аккумулирующий соли щелочных элементов и сопутствующие примеси.

Наблюдаемая вариабельность морфологии и состава солевых частиц имеет несколько объяснений: Физиологический аспект – различия в обмене макроэлементов у женщин, проживающих в условиях радиоэкологической нагрузки. Экологический фактор – влияние геохимической среды (состав подземных вод, почвенные соли, миграция хлоридов и фосфатов). Метаболический уровень – различная способность организма к регуляции баланса калия, натрия и фосфора в период беременности. Включение примесей (P, Al, Na) подтверждает сложный характер минеральной составляющей плаценты и указывает на её роль как индикатора биогеохимических условий региона.

Превалирование K-Cl фаз над Na-содержащими может отражать: адаптационные процессы в организме матери, связанные с необходимостью поддержания оптимального уровня калия для

клеточной активности и развития плода; специфику минерального состава питьевых и подземных вод Акмолинской области, где зачастую наблюдается повышенное содержание калия по сравнению с натрием; вероятное участие плаценты в регуляции ионного обмена с целью защиты плода от избытка натрия, который неблагоприятен при беременности (например, в контексте риска преэклампсии и гипертонии).

Таким образом, полученные данные позволяют рассматривать солевые микрочастицы плаценты как биогеохимический индикатор, отражающий взаимодействие экосистемных и физиологических факторов. Это подтверждает важность комплексного подхода к изучению элементного состава плаценты в условиях экологически напряжённых территорий.

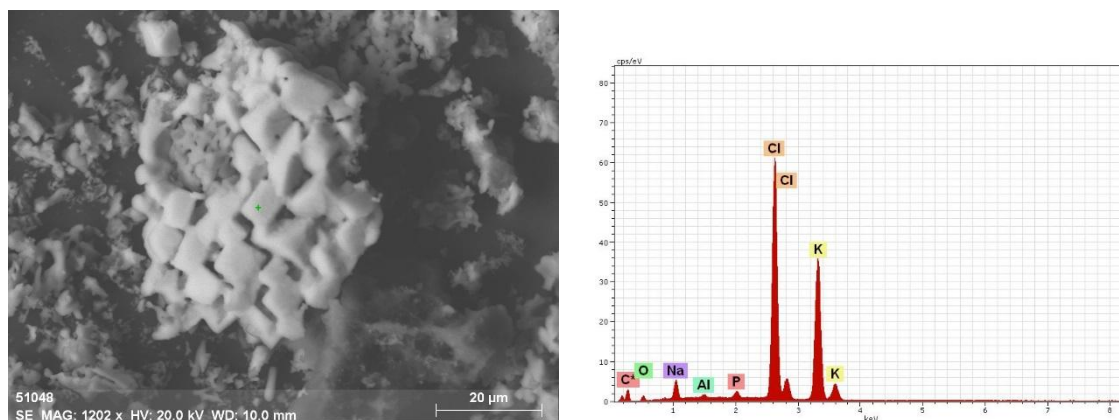


Рисунок 3. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы K – Cl, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области.

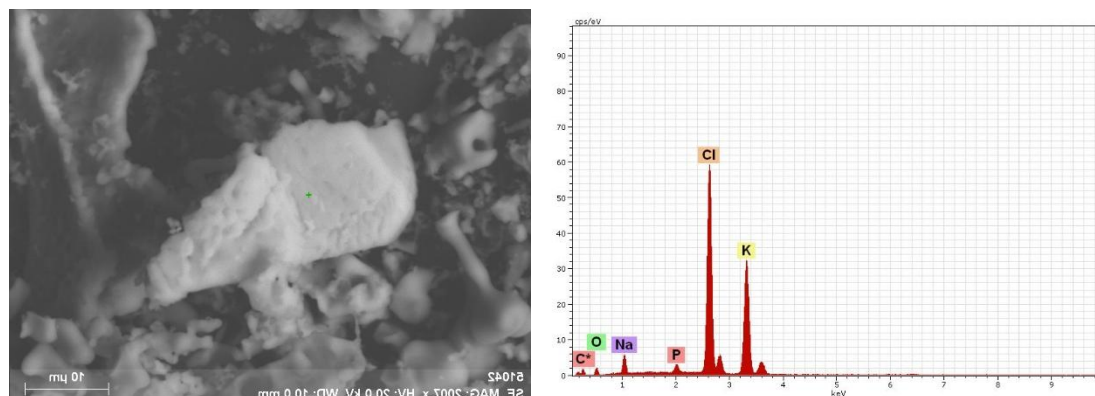


Рисунок 4. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы K – Cl, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области.

Результаты, полученные при исследовании плацентарных тканей жительниц Акмолинской области, хорошо согласуются с данными, представленными в международной литературе. В ряде работ отмечается, что в плаценте могут формироваться и аккумулироваться кристаллические солевые фазы, преимущественно хлориды и фосфаты щелочных и щёлочноземельных элементов.

Так, исследования, проведённые в Восточной Европе и странах СНГ, указывают на значительное содержание калийсодержащих соединений в плацентарных тканях, что связывается с высоким уровнем поступления калия с питьевой водой и продуктами питания (Shevchenko, 2018; Li, 2017). В работах авторов из Китая и Индии подчёркивается роль геохимической среды

в формировании плацентарного элементного профиля: выявлено, что в районах с преобладанием калийных солей в подземных водах концентрация К-Cl фаз в плаценте достоверно выше, чем в регионах с натриевым типом солевого баланса (Kumar, 2019; Ali, 2020).

Отдельного внимания заслуживает вопрос о присутствии примесей фосфора и алюминия. По данным зарубежных исследователей, фосфатные соединения в плаценте могут быть связаны как с нормальными физиологическими процессами (формирование костной ткани плода, участие фосфора в энергетическом обмене), так и с техногенным воздействием (использование фосфатсодержащих удобрений в сельском хозяйстве, техногенные выбросы). Примеси алюминия также нередко фиксируются в плацентарных тканях жителей регионов с развитой промышленностью, что трактуется как индикатор техногенного загрязнения окружающей среды (Ivanova, 2021; Yerzhanova, 2025).

1. Сопоставление полученных данных с литературными источниками позволяет сделать несколько выводов: Превалирование калийсодержащих фаз в плаценте является закономерным и характерным для регионов с повышенным содержанием калия в воде и почвах, что подтверждает геохимическую специфику Акмолинской области. Наличие примесей фосфора и алюминия указывает на смешанный характер накопления микроэлементов – как эндогенного (физиологического), так и экзогенного (экологического) происхождения (Yerzhanova, 2025; Aleksandrovskaia, 2016). Сходство с международными исследованиями подчёркивает универсальность процессов, но вместе с тем выявляет региональные особенности, связанные с радиэкологическими условиями Казахстана (Golubkina, 2017; Zhumay, 2021).

Таким образом, плацента может рассматриваться не только как биологический барьер и индикатор индивидуального состояния матери и ребёнка, но и как ценный объект для мониторинга экологических условий на глобальном уровне. Сопоставление с литературными данными подтверждает, что выявленные К-Cl и Na-содержащие фазы, а также фосфатные включения соответствуют мировым тенденциям, но имеют региональную специфику, отражающую особенности Акмолинской области.

На образце, представленном на Рисунке 5, в изученных частицах наблюдается преобладание хлора.

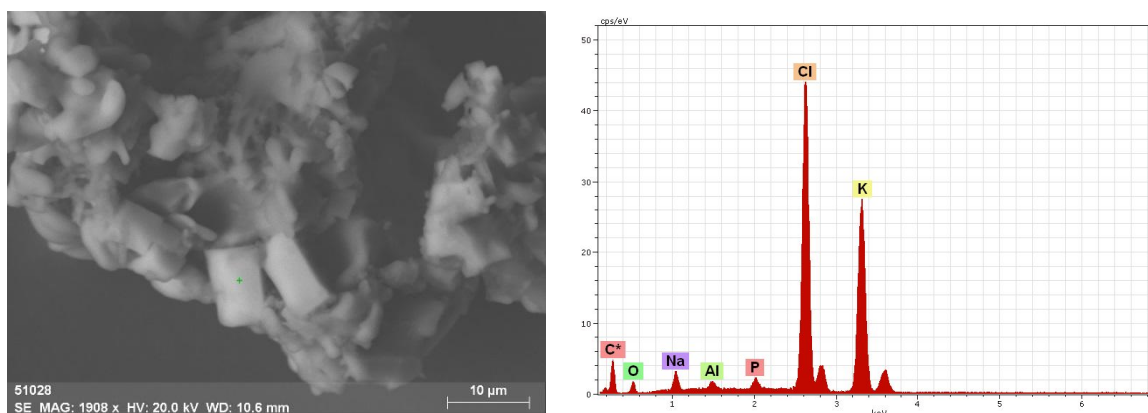


Рисунок 5. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы К – Cl, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области.

Солевые частицы на Рисунке 3 демонстрируют заметный химический разброс по примесям: фиксируются сочетания К–Cl с Na, P и/или Al, более «чистые» составы образца К–Cl–Na–P без Al показаны на Рисунке 4. В ряде случаев присутствие фаз типа галогенидов с поверхностной адсорбцией объясняется относительным преобладанием хлора над катионной компонентой (т. к.

выделены высокие пики Cl при умеренных K, Na), либо частичной дегидратацией/перекристаллизацией в ходе подготовки.

Выявлены две устойчивые группы фосфорсодержащих частиц, изображенные на Рисунках 6, 7. По рисунку 6 в группе P–Na-типа фосфор доминирует, натрий является вторым по интенсивности компонента, который согласуется с натриевыми фосфатами либо фосфоорганикой. В группе P–Ca-типа фосфор при существенных концентрациях кальция (Рисунок 7) соответствует кальциевым фосфатам в виде апатитоподобных или кальцифилоксис-ассоциированных фаз.

Частицы, содержащие фосфор, являются достаточно типичными. Иногда этот элемент преобладает в составе частиц, имея при этом достаточно сложный химический состав, в котором на втором месте по накоплению стоит натрий (Рисунок 6). В других образцах фосфор стоит на первом месте, а на втором месте стоит кальций (Рисунок 7). Возможно, именно эти частицы и соли в конечном счете формируют те кальцинаты, которые мы описывали, находили при изучении морфологии.

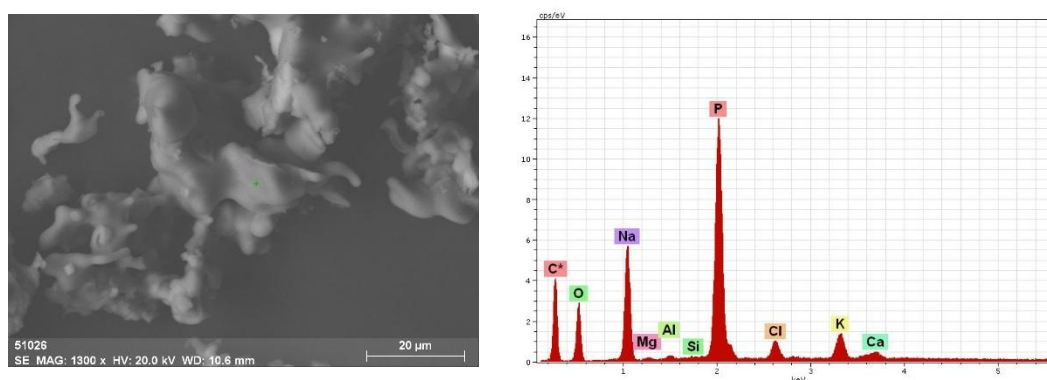


Рисунок 6. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы P – Na, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области.

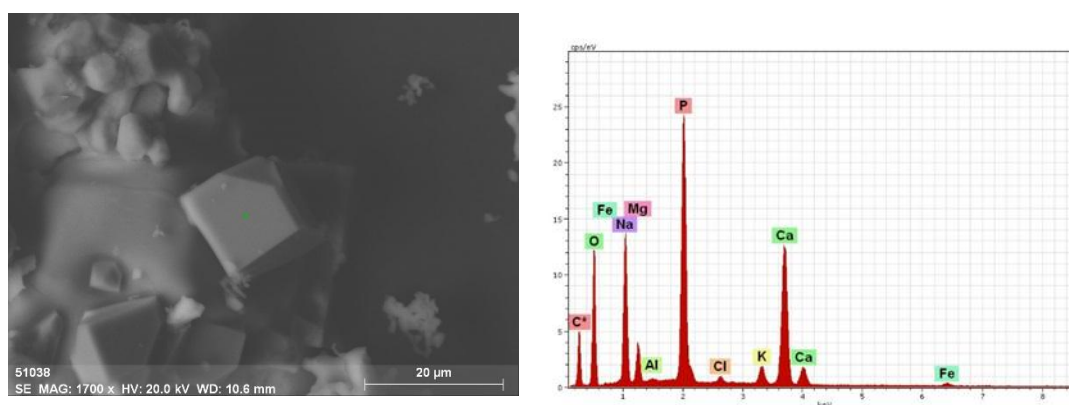


Рисунок 7. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы P – Ca, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области

С учётом ранее описанной нами морфологической картины плацентарной кальцификации обнаруженные фосфатные микрофазы, вероятно, служат минералогическими прототипами участков кальцинатов и могут участвовать в их наращивании.

В одном из образцов обнаружена частица, обогащённая йодом при сопутствующем медном сигнале (Рисунок 8).

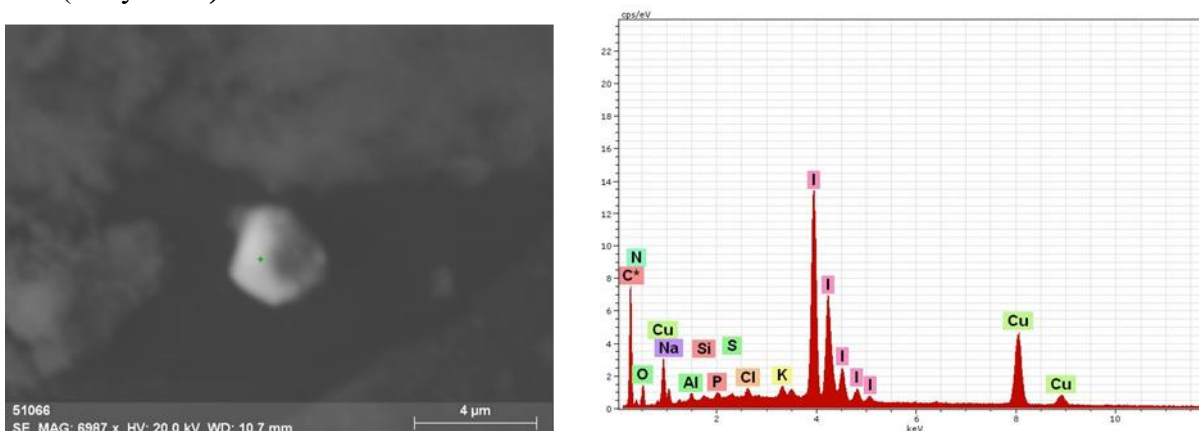


Рисунок 8. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы I – Cu, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области

Такой I–Cu-тип является нетипичным для плаценты и требует отдельной верификации источника: при этом возможны сценарии алиментарного/водного поступления галогенов, локальная адсорбция йодсодержащих соединений на медь-комплексах либо техногенный аэрозоль. На текущем массиве данная трактовка остаётся гипотетической.

4. Обсуждение

Преобладание K–Cl и присутствие Na указывают на физиологически релевантные ионы, характерные для плацентарной среды (трофобластические микродомены, межворсинчатое пространство). Их фиксация в виде микрокристаллитов может быть следствием двух процессов:

1. Эндогенных процессов: локальная дегидратация/кристаллизация солей происходит из-за снижения адаптации барьерной функции плаценты из-за сбоев работы иммунной системы, сопутствующих соматическим заболеваниям, а также при осложненных формах беременности.

2. Экзогенных процессов: осаждение аэрозолей галогенидов является результатом эмиссий от золотоуранодобывающих производств как техногенный источник и контакт с растворами в быту.

Систематическое доминирование K над Na при общей Cl-нагрузке и повторяемость мотивов на всех исследуемых образцах склоняют к эндогенному ядру с суперпозицией экзогенных примесей (Al и др.).

Наличие P–Ca- и P–Na-частиц в плаценте является причиной биоминерализационных процессов с образованием кальцинатов в тканях плаценты, а фосфорорганические матрицы показывают патологические процессы в остатках мембраны или везикулах оболочек плаценты.

Корреляция с морфологически обнаруженными кальцинатами поддерживает гипотезу, что выявленные фосфатные микрофазы участвуют в инициации или в росте кальцинатов. Еще одной причиной кальцинации остаются техногенные загрязняющие геохимические вещества (фоновая фосфатная пыль, апатитсодержащие аэрозоли).

Обнаруженные I–Cu-частицы в единичном экземпляре могут отражать алиментарное или водное поступление йода с йодированной водой или с солью, с последующей фиксацией на медь-связывающих белках. При микрофазном анализе влияние Au–Pt напыления на пики I и Cu можно исключить.

5. Заключение

Проведённые исследования микроминерального состава плацент жительниц Акмолинской области методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионным анализом позволили выявить специфику накопления и распределения геохимических элементов в тканях плаценты.

Доминирующим компонентом плацентарных микрочастиц являются соли калия и хлора с переменным содержанием натрия и примесями алюминия. Преобладание К–Cl фаз свидетельствует о характерных ионных процессах в плацентарной среде и может быть связано как с эндогенными механизмами, так и с особенностями региональной экологической ситуации, т. е. поступление геохимических элементов из внешней окружающей среды.

Обнаруженные в плаценте фосфорсодержащие частицы представлены двумя типами - P–Na и P–Ca. Они и являются минеральной основой для формирования кальцинатов в плацентарной ткани, подтверждается и морфологическими данными о кальцификации, что частично снижает барьерную функцию плаценты и влияет на уровень рождаемости в регионе.

Единичное обнаружение I–Cu-частицы имелось в биотантах из г. Кокшетау, что указывает на антропогенное влияние производств и на экологическое состояние региона.

Полученные данные подтверждают, что факторы среды обитания оказывают прямое влияние на элементный и минеральный состав плаценты, которая выступает не только биологическим барьером, но и индикатором экологической ситуации региона и здорового населения. При сборе материала в г. Кокшетау было выявлено большее количество женщин, страдающих патологией щитовидной железы, что подтверждает наличие I–Cu-частицы в плаценте.

Таким образом, результаты исследования подчеркивают значимость плаценты как чувствительного маркера воздействия эколого-геохимических факторов на организм матери и плода. Выявленные микроминеральные фазы отражают особенности региональной биогеохимической обстановки и могут использоваться в качестве дополнительного критерия для медико-экологического мониторинга и профилактики нарушений репродуктивного здоровья.

Перспективным направлением является расширение выборки образцов, сопоставление микроминерального состава плаценты с качеством питьевой воды и воздушной среды, а также комплексный анализ системы «мать–плацента–плод» с использованием современных высокочувствительных методов (ICP-MS, картирующий СЭМ-ЭДС, μ -XRD).

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - А.Е., Е.М.; методология - С.Н.; программное обеспечение - Е.Ж., А.А., А.Н.; валидация - А.А., А.Н.; формальный анализ - А.Е., Е.М., С.Н.; исследование - А.Е.; ресурсы - А.Е., А.А., А.Н., А.Е.; курирование данных - А.Е., А.Е.; написание-подготовка оригинального черновика - А.Е.; написание-рецензирование и редактирование - А.Е., Е.М., С.Н.; визуализация - А.Н., А.Е., А.А.; руководство - А.Е. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Ержанова, Ардак – PhD-докторант, обучающийся по образовательной программе: «D060800 - Экология», Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, ул. Абая, 76, Кокшетау, Казахстан, 020000; email: ar.yerzhanova@satbaeyev.university, <https://orcid.org/0009-0003-0350-9005>

Меркибаев, Ерик – PhD, старший преподаватель, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан, 050016; email: y.merkibayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-3869-6835>

Нурмакова, Сауле – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан, 050016; s.nurmakova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-2896-4261>

Жумай, Ерлан – PhD, старший преподаватель, Кокшетауский университет имени Ш.Уалиханова, ул. Абая, 76, Кокшетау, Казахстан, 020000; email: erlanzhumai@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7100-2471>

Еркинқызы, Алина – магистр, преподаватель, Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова, ул. Толе би, 94, Алматы, Казахстан, 050016; email: dr_yerkinovna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4775-9396>

Ахметжан, Ануар – кандидат медицинских наук, доцент, Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова, ул. Толе би, 94, Алматы, Казахстан, 050016; email: akhmetzhan@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6554-4848>

Ниязова, Акмарал – PhD, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан, 050016; email: niyazova.akma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3241-5193>

9. Финансирование: отсутствует.

10. Благодарность: выражаем благодарность коллективу перинатального центра г. Кокшетау.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Akhmetzhanov, M. (2022). Urban pollution and public health in Kazakhstan: Case study of Kokshetau and Stepnogorsk. *Environmental Research Letters*.
2. Aleksandrovskaia, E.Yu., Sindireva, A.V., Golubkina, N.A., Chuyanov, G.I. (2016). The influence of selenium on yield and grain quality of spring soft wheat in the southern forest-steppe of Omsk region [Vliyanie selena na urozhaynost' i pokazateli kachestva zerna yarovoy myagkoy pshenitsy v usloviyakh yuzhnoy lesostepi Omskoy oblasti]. *Biological Sciences [Biologicheskie nauki]* 96.
3. Ali, A.M., Osman, F. (2020). Phosphate and aluminum compounds in human placenta: Implications of environmental exposure. *Toxicology Reports* 7, 1481–1488.
4. Alimzhanova, G.Zh., Suleimenov, E.A. (2021). Environmental situation in Akmola region and population health [Ekologicheskaya situatsiya v Akmolinskoy oblasti i zdorov'e naseleniya]. *Vestnik KazNU*.
5. Badri, N., Mhamdi, M., Florea, A., Matei, H., Tekaya, W.-H., Hila, L., Maghraoui, S., Tekaya, L. (2018). Transplacental passage and subcellular accumulation of lanthanum within maternal and fetus side of placenta: A transmission electron microscopy study. *Biol Syst Open Access* 7(1), 186. <https://doi.org/10.4172/2329-6577.1000186>
6. Desforges, M., Sibley, C.P. (2010). Placental nutrient supply and fetal growth. *International Journal of Developmental Biology* 54, 377–390.
7. Eshkoli, T., Sheiner, E., Ben-Zvi, Z., Feinstein, V., Holcberg, G. (2011). Drug transport across the placenta. *Current Pharmaceutical Biotechnology* 12, 707–715.
8. Fenger, F. (2016). The chemical composition of the placenta. *Journal of Biological Chemistry* 29(1), 19–26. <http://www.jbc.org/content/29/1/19.full.pdf>

9. Golubkina, N.A., Sindireva, A.V., Zaytsev, V.F. (2017). Intraregional variability of selenium status of the population [Vnutriregional'naya variabel'nost' selenovogo statusa naseleniya]. *Yug Rossii: Ekologiya, Razvitie [The south of Russia: Ecology, Development]* 12(1), 107–127.
10. Gorbatko, G.G. (1999). *Content of macro- and microelements in biosubstrates of the “mother–placenta–newborn–child” system in a mining region* [Doctoral dissertation, Ufa State University].
11. Gude, N.M., Roberts, C.T., Kalionis, B., King, R.G. (2004). Growth and function of the normal human placenta. *Thrombosis Research* 114, 397–407.
12. Ivanova, E.P., Kostenko, V.A. (2021). Aluminum and its compounds in biological tissues as an indicator of technogenic pollution [Alyuminiy i ego soedineniya v biologicheskikh tkanyakh kak indikator tekhnogennoy zagryazneniya]. *Medsitina truda i promyshlennaya ekologiya [Occupational medicine and industrial ecology]* (1), 33–39.
13. Knipp, G.T., Audu, K.L., Soares, M.J. (1999). Nutrient transport across the placenta. *Advanced Drug Delivery Reviews* 38, 41–58.
14. Kumar, S., Rao, M. (2019). Variations in placental mineral composition in regions with contrasting geochemistry of groundwater. *Indian Journal of Medical Research* 150(5), 421–428.
15. Li, H., Zhang, Y., Wang, Q. (2017). Accumulation of mineral salts in the placenta: A case study in high-potassium groundwater areas of China. *Environmental Geochemistry and Health* 39(4), 989–1002.
16. Lugovaya, E.A., Atlasova, E.M. (2014). Relationship of parameters of the elemental system of the mother and infant [Vzaimosvyaz' parametrov elementnoy sistemy organizma materi i grudnogo rebenka]. *Mikroelementy v meditsine [Trace elements in medicine]* 15(3), 33–41.
17. Mikelson, B., Larsen, E. (2015). Potassium and sodium balance in maternal and fetal tissues: Environmental and nutritional factors. *Journal of Reproductive Medicine* 60(3), 115–123.
18. Pacifici, G.M., Nottoli, R. (1995). Placental transfer of drugs administered to the mother. *Clinical Pharmacokinetics* 28, 235–269.
19. Stawarz, R., Formicki, G., Chrobaczynska, M., Czajkowska, M., Chryc, K., Kuezkowska-Kuzniar, A., Massanyi, P., Skalba, P. (2011). Accumulation of cadmium and lead in placenta and amnion of women from Upper Silesian region, Poland. *Journal of Environmental Research and Development* 5, 871–879.
20. Savchenko, L.A., Guryeva, N.I. (2016). Potassium and sodium in placenta as indicators of ecological and biogeochemical situation [Kaliy i natriy v platsente kak indikatory ekologo-biogeokhimicheskoy situatsii]. *Human Ecology [Ekologiya cheloveka]* (12), 28–34.
21. Sharipova, L.K. (2020). Reproductive health of women under technogenic exposure [Reproduktivnoe zdorov'e zhenshchin v usloviyakh tekhnogennoy vozdystviya]. *Mediko-biologicheskie problemy ekologii [Medical and biological problems of man]*.
22. Shevchenko, V.P., Akhmetova, Zh.K. (2018). Effect of groundwater salt composition on placental element profile [Vliyanie solevogo sostava podzemnykh vod na elementnyy profil' platsenty]. *Gigiena i sanitariya [Hygiene and sanitation]* 97(6), 540–545.
23. World Health Organization. (2021). *COVID-19 and environmental health: Implications and response*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/340574>
24. Yerzhanova, A., Baranovskaya, N., Khussainov, A., Zhumay, Y., Niyazova, A., Akhmetzhan, A., Sarsembin, U. (2025). Influence of the environment on the chemical element content in women's blood. *International Journal of Environmental Impacts* 8(1), 203–209.
25. Yerzhanova, A., Baranovskaya, N., Khussainov, A., Zhumay, Y., Sarsembin, U., Niyazova, A., Akhmetzhan, A. (2025). Statistical indicators of the concentration of chemical elements in biological tissues in the Akmol region. *International Journal of Environmental Impacts* 8(3), 501–510.

26. Zakrzewska, M., Biaonska, D., Sawicka-Kapusta, K. (2002). Cadmium accumulation in fetus and placenta of bank voles (*Clethrionomys glareolus*, Schreber 1780). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 69, 829–834.
27. Zhumabekova, A., Yessenov, A. (2022). Uranium mining and environmental health risks in Northern Kazakhstan. *Environmental Monitoring and Assessment*.
28. Zhumay, Y., Khussainov, A., Kurmanbayeva, A., Skipin, L., Onerkhan, G. (2021). Assessment of hydrophysical and hydrochemical features of water bodies: A case study of Lake Imantau, Kazakhstan. *Water Conservation and Management* 5(2), 108–113.
<https://doi.org/10.26480/wcm.02.2021.108.113>

Плацента экологиялық жағдайдың биомаркері ретінде: Ақмола облысындағы микроминералды талдау нәтижелері

Ардак Ержанова, Ерик Меркибаев, Сауле Нурмакова, Ерлан Жұмай, Ануар Ахметжан, Алина Еркінқызы, Акмарал Ниязова

Андатпа. Мақалада уран мен алтын кенін өндірудің жоғары деңгейімен, сондай-ақ табиғи радон аномалияларының болуымен сипатталатын радиоэкологиялық шиеленісі жоғары аймақ – Ақмола облысы тұрғындарының плаценталарының микроминералдық құрамын кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты экологиялық-геохимиялық факторлардың «ана–плацента–ұрық» жүйесіне әсерін бағалау үшін плаценталық тіндердегі минералдық фазалардың жиналу және таралу ерекшеліктерін анықтау болды.

Әдістемелік негіз ретінде сканирлеуші электронды микроскопия (СЭМ, Hitachi S-3400N) және энергия-дисперсиялық спектроскопия (Bruker XFlash 5010) қолданылды, бұл минералды қосындылардың морфологиясы мен химиялық құрамын дәл анықтауға мүмкіндік берді. Ақмола облысында тұратын әйелдердің плаценталарын талдау барысында калий мен хлор тұздарының, сондай-ақ натрий мен алюминий қоспаларының бар екендігі анықталды. Бұдан бөлек, екі типтегі фосфорқұрамды фазалар (P–Na және P–Ca) табылды, олар плаценталық тіндердің кальцификациясына және патологиялық кальцинаттардың түзілуіне ықпал етуі мүмкін. Ерекше назар аударатын жайт – бұрын плаценталық құрылымдарда сипатталмаған сирек кездесетін I–Cu бөлшектерінің анықталуы. Бұл факт зерттелген аймақтың геохимиялық жағдайын тікелей көрсетеді және плацентада техногендік әрі табиғи ластануға байланысты маркерлік элементтердің жиналуы мүмкін екендігін дәлелдейді.

Осылайша, алынған нәтижелер плацентаны тек ұрықтың өмір сүруін қамтамасыз ететін орган ретінде ғана емес, сонымен қатар қоршаған ортаның биоиндикаторы ретінде қарастыруға болатынын көрсетеді. Арнайы минералдық фазалардың болуы аймақтың эколого-геохимиялық ахуалын және оның әйелдердің репродуктивті денсаулығына ықпалын нақты бейнелейді. Зерттеу нәтижелері жүктілік асқынуларының алдын алу және нәрестелердің денсаулығын қорғауға бағытталған кешенді зерттеулер мен профилактикалық шараларды әзірлеу қажеттігін айқындайды.

Түйін сөздер: плацента; Ақмола облысы; микроэлементтер; сканерлеуші электронды микроскопия; энергия дисперсиялық талдау; экологиялық және геохимиялық жағдай; кальцинациялар; ана мен бала денсаулығы.

Placenta as a biomarker of the ecological situation: results of micromineral analysis in Akmola region

Ardak Yerzhanova, Yerik Merkibayev, Saule Nurmakova, Yerlan Zhumai, Anuar Akhmetzhan, Alina Yerkinkyzy, Akmaral Niyazova

Abstract: The article presents the results of a comprehensive study of the micromineral composition of placentas from residents of the Akmola region, an area characterized by high radioecological stress due to intensive uranium and gold mining, as well as the presence of natural radon anomalies. The primary objective of the research was to identify the peculiarities of mineral phase accumulation and distribution in placental tissue, thereby assessing the influence of ecological and geochemical factors on the “mother–placenta–fetus” system.

The methodological basis included scanning electron microscopy (SEM, Hitachi S-3400N) and energy-dispersive spectroscopy (Bruker XFlash 5010), which ensured high precision in determining the morphology and chemical composition of mineral inclusions. The analysis of placental samples from women residing in the Akmola region revealed the presence of potassium and chlorine salts, accompanied by sodium and aluminum impurities. In addition, two types of phosphorus-containing phases (P–Na and P–Ca) were identified, which play a significant role in the calcification of placental tissue and may contribute to the formation of pathological calcifications.

Of particular interest was the detection of a rare I–Cu particle association, previously not described in placental structures. This finding directly reflects the specific geochemical conditions of the studied region and confirms the potential for placental accumulation of marker elements related to both anthropogenic and natural contamination.

Thus, the obtained results demonstrate that the placenta can be considered not only as an organ vital for fetal development but also as a bioindicator of environmental conditions. The presence of specific mineral phases reflects the actual ecological and geochemical situation and its potential impact on women’s reproductive health. The findings emphasize the necessity of further interdisciplinary research and the development of preventive measures aimed at reducing pregnancy complications and safeguarding newborn health.

Keywords: placenta; Akmola region; microelements; scanning electron microscopy; energy dispersive analysis; ecological and geochemical situation; calcifications; health of mother and child.