

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В МЕДИЦИНЕ

TRACE ELEMENTS IN MEDICINE

Том 27

Март

March

Vol. 27

Вып. 1

2026

2026

No. 1

Москва • 2026 • Moscow

**Орган Российского общества медицинской элементологии
и Института микроэлементов ЮНЕСКО**
*Journal of the Russian Society of Trace Elements in Medicine
and Trace Element - Institute for UNESCO*

**Журнал основан и издается при поддержке
АНО «Центр биотической медицины»**
*Founded and supported by
ANO "Centre for Biotic Medicine"*

Номер выпущен в марте 2026
Published in March 2026

Международный научно-практический рецензируемый журнал
Издается с 2000 г. на русском и английском языках
*The journal is peer-reviewing
Issued since 2000 in Russian and English*

Журнал включен в перечень ВАК:

1.5.4. Биохимия (медицинские науки); 1.5.5. Физиология человека и животных (медицинские науки);
1.5.8. Математическая биология, биоинформатика (медицинские науки); 1.5.24. Нейробиология (медицинские науки); 3.3.3. Патологическая физиология (биологические, медицинские науки); 3.3.5. Судебная медицина (медицинские науки); 3.3.6. Фармакология клиническая фармакология (биологические науки); 3.3.8. Клиническая лабораторная диагностика (биологические, медицинские науки)

*Journal is accredited by Supreme Attestation Commission
of the Russian Federation:*

1.5.4. Biochemistry (medical sciences); 1.5.5. Physiology of humans and animals (medical sciences);
1.5.8. Mathematical biology, bioinformatics (medical sciences); 1.5.24. Neurobiology (medical sciences); 3.3.3. Pathological physiology (biological, medical sciences); 3.3.5. Forensic medicine (medical sciences); 3.3.6. Pharmacology, clinical pharmacology (biological sciences); 3.3.8. Clinical laboratory diagnostics (biological, medical sciences)

Журнал выходит 4 раза в год
The journal is quarterly

Адрес редакции:
105064 Москва, ул. Земляной Вал, 46, АНО ЦБМ
E-mail: journaltem@gmail.com
Факс: (495)936-01-38

Address:
105064 Moscow, Zemlyanoy Val str., 46, NGO CBM
E-mail: journaltem@gmail.com
Fax: (495)936-01-38

Подписано в печать 30.03.2026. Формат 60×90/8
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7.25. Тираж 50 экз.

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

**ЙОДДЕФИЦИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ В РОССИИ:
ПРОБЛЕМА ПРЕДОТВРАТИМА, НО НЕ РЕШЕНА****Д.В. Рисник¹, В.М. Коденцова^{2*}**¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Российская Федерация, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12² ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи»
Российская Федерация, Москва, Устьинский проезд, д. 2/14

РЕЗЮМЕ. Недостаточное поступление йода с пищей является причиной возникновения йоддефицитных состояний и ассоциированных с ними заболеваний.

Цель исследования – охарактеризовать состояние йодной обеспеченности населения и оценить предпринимаемые меры для устранения йододефицита.

Йоддефицитные состояния легкой степени характерны для всех групп населения в России. Проблема йодной недостаточности признается решенной при условии, что не менее 90% домохозяйств используют в питании йодированную соль, однако в России эта доля составляет около 30%. В подавляющем большинстве стран с доказанным дефицитом йода принято законодательство по йодированию соли. Метаанализ результатов обязательного обогащения йодом соли продемонстрировал снижение частоты развития зоба на 74%. В России работа над законом о профилактике йоддефицитных заболеваний проводится в течение почти четверти века. Добровольное йодирование соли и обогащение йодом пищевых продуктов осуществляется по инициативе производителей. С 2020 г. в Российской Федерации реализуется СанПиН 2.3/2.4.3590-20, регламентирующий обязательное использование йодированной соли для приготовления блюд в организованном питании детей. В отдельных исследованиях получены подтверждения эффективности этой меры для повышения потребления йода и увеличения йодоурии. В силу недостаточных знаний о роли адекватной обеспеченности организма йодом в поддержании здоровья, у населения отсутствует осознанный выбор йодированной соли.

Заключение. Йоддефицитные состояния полностью предотвратимы только при проведении популяционной профилактики йодированной солью (использование ее в питании, в том числе в пищевой промышленности). В России главной причиной не достижения цели устранения дефицита йода в питании населения и связанных с ним заболеваний является отсутствие закона о профилактике йоддефицитных состояний. В условиях отсутствия закона о всеобщем йодировании пищевой соли, для большего охвата населения целесообразно применять ее при выпечке хлебобулочных изделий и изготовлении некоторых пищевых концентратов. Для повышения информированности различных групп населения о последствиях дефицита йода и повышения мотивации к использованию йодированной соли в питании необходима разработка систематических образовательных программ для разных возрастных групп населения. Опыт использования йодированной соли в образовательных учреждениях уместно расширить на другие организованные коллективы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: йод, йодурия, йододефицит, йодированная соль, пищевые продукты, обогащение продуктов питания.

Для цитирования: Рисник Д.В., Коденцова В.М. Йоддефицитные состояния в России: проблема предотвратима, но не решена. Микроэлементы в медицине. 2026;27(1):3–12. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-3-12.

ВВЕДЕНИЕ

Более 50% субъектов Российской Федерации являются йоддефицитными, около 60% населения нашей страны проживает в регионах с природно-обусловленным дефицитом этого микроэлемента (Дедов и др., 2006). По данным ФГБУ «НМИЦ эндокринологии им. академика И.И. Дедова» Минздрава России, фактическое

потребление йода жителем России по-прежнему составляет всего 40–80 мкг в день, что в 2-3 раза меньше рекомендуемой нормы потребления (150 мкг), покрывающей физиологическую потребность организма взрослого человека. Причиной дефицита йода является недостаточное потребление населением рыбы и морепродуктов – основных источников йода (Коденцова и др., 2015;

* Адрес для переписки:

Коденцова Вера Митрофановна

E-mail: kodentsova@ion.ru

Сенькевич и др., 2018). Недостаточное поступление йода с пищей является причиной 65% случаев заболеваний щитовидной железы у взрослых и 95% у детей. Профилактика заболеваний, связанных с дефицитом йода, позволяет предотвратить отставание детей в физическом и психическом развитии, снижение интеллекта, значительно снизить частоту различных заболеваний щитовидной железы, многих врожденных пороков развития, невынашивания беременности и детской смертности (Белых, 2018; Мельниченко и др., 2019; Алфёрова и др., 2019; Мельниченко и др., 2019; Агаева и др., 2022).

Недостаточное поступление йода с пищей является причиной возникновения йоддефицитных состояний и ассоциированных с ними заболеваний.

Цель исследования – охарактеризовать состояние йодной обеспеченности населения и оценить предпринимаемые меры по устранению йододефицита.

Обзор существующей по проблеме литературы преимущественно за последние годы осуществляли по базам данных РИНЦ, а также в системе Google Scholar по ключевым словам йод, йодированная соль, йодоурия. Под критерии исключения попадали тезисы, опубликованные в сборниках материалов конференций, и исследования, выполненные на животных.

ОБОГАЩЕНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ЙОДОМ

Обогащение эссенциальными микронутриентами пищевых продуктов, в том числе пищевой соли йодом, – стратегия, которая более века безопасно и эффективно используется для предотвращения дефицита микронутриентов, особенно в странах, где имеется доказанный дефицит микронутриентов на уровне всего населения (Keats et al., 2019; Трошина, 2022). Использование йодированной соли является универсальным, проверенным, безопасным, надежным и экономически обоснованным средством массовой (популяционной) профилактики йоддефицитных заболеваний.

В соответствии с ГОСТ Р 51574-2000 «Соль поваренная пищевая. Технические условия» содержания йода в соли 40 ± 15 мг йода на 1 кг соли. Аналогичный норматив принят в странах СНГ. В России подвергается обогащению йодом путем добавления йодата калия менее 30% соли. Большая часть соли (до 80%) поступает в организм с гото-

выми пищевыми продуктами (сыр, колбасные изделия, хлеб). Исходя из этого, потребляя 10 г соли в день, потребитель будет получать 3–5 г йодированной соли (Герасимов, 2014).

Проблема йодной недостаточности считается решенной при условии, что не менее 90% домохозяйств используют в питании йодированную соль. В Российской Федерации йодированную соль в питании употребляет 24–50% (в среднем около 30%) населения в отличие от входящих в Евразийский экономический союз стран, где введено всеобщее йодирование соли (Герасимов, 2019).

БИОХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ЙОДДЕФИЦИТНЫХ НАРУШЕНИЙ

Йод является структурным компонентом тиреоидных гормонов – тироксина (Т4) и трийодтиронина (Т3), которые регулируют основной обмен веществ, теплопродукцию и развитие центральной нервной системы. При недостаточном поступлении йода щитовидная железа не может синтезировать адекватное количество этих гормонов. В ответ на снижение уровня Т3 и Т4 гипофиз увеличивает секрецию тиреотропного гормона (ТТГ), который стимулирует гиперплазию и гипертрофию тиреоцитов, приводя к развитию компенсаторного зоба (Sorrenti et al., 2021; Brough, Skeaff, 2024). Однако эта компенсаторная реакция неполная и не восстанавливает нормальную продукцию тиреоидных гормонов до физиологического уровня, особенно в критические периоды развития плода и новорожденно-го. Йод также играет роль неспецифического антиоксиданта, участвуя в нейтрализации активных форм кислорода, что особенно важно для защиты развивающегося мозга. Дефицит йода в критические периоды развития (внутриутробный период, младенчество, раннее детство) может привести к необратимым нейрокогнитивным нарушениям, включая снижение интеллекта, нарушение тонких моторных навыков и проблемы с речевым развитием (Manousou et al., 2018).

ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ МЕРЫ ПО УСТРАНЕНИЮ ЙОДДЕФИЦИТНЫХ СОСТОЯНИЙ У НАСЕЛЕНИЯ. МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И СОСТОЯНИЕ В РОССИИ

За период 1990–2022 гг. в 126 странах из 130 стран мира, где существовал дефицит йода, было принято законодательство по йодированию соли. Нормативные правовые акты, предусматриваю-

щие йодирование пищевой продукции, действуют в странах Евразийского экономического союза, а также в странах СНГ, в том числе Закон Республики Казахстан от 14.10.2003 № 489-III «О профилактике йододефицитных заболеваний», Закон Кыргызской Республики от 18.02.2000, № 40 «О профилактике йододефицитных заболеваний»; постановление Совета Министров Республики Беларусь от 06.04.2001 № 484 «О предупреждении заболеваний, связанных с дефицитом йода».

Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 05.03.2019 № 146 «Об утверждении специфических санитарно-эпидемиологических требований к объектам промышленности по переработке сельскохозяйственной продукции, продовольственного сырья и производству пищевой продукции» (пункт 10) и дополнением в закон «О качестве и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов для жизни и здоровья человека» (статья по требованиям к йодированной соли, 2008 г.) предусмотрено при производстве пищевой продукции (за исключением сыров и сырных продуктов, продуктов переработки океанических рыб и морепродуктов) применение только йодированной соли.

Работа над законом о профилактике йоддефицитных заболеваний в России проводится в течение почти четверти века, начиная с Постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации «О профилактике йоддефицитных состояний» (от 2 мая 1997 года № 11). Подробное описание истории работы над законом и современное состояние правового регулирования проблемы отражено в научных журналах в статье Е.А. Трошиной (Трошина, 2022) и в виде научного памфлета в статье Г.А. Мельниченко с соавт. (Мельниченко и др., 2019).

В настоящее время в России осуществляется добровольное йодирование соли и обогащение йодом пищевых продуктов по инициативе производителей. Профилактические мероприятия в России не носят постоянного и систематического характера, не охватывают все население, а добровольная модель потребления йодированной соли не отвечает международным критериям профилактических программ и не позволяет достигнуть существенного эффекта в устранении йодного дефицита (Коденцова и др., 2015; Трошина, 2022; Рисник и др., 2025).

С 2020 г. в Российской Федерации реализуются СанПиН 2.3/2.4.3590-20 «Санитарно-

эпидемиологические требования к организации общественного питания населения», регламентирующие обязательное использование йодированной соли для приготовления блюд в организованном питании детей. Оценка эффективности выбранной стратегии профилактики йодного дефицита в Тюменской и Новосибирской областях показала, что использование йодированной соли при приготовлении солесодержащих блюд в дошкольных образовательных учреждениях полностью покрывает потребности в йоде у детей дошкольного возраста (Суплотова и др., 2023). Увеличение йодоурии подтвердило улучшение йодной обеспеченности школьников (Муштафина и др., 2025).

УЛУЧШЕНИЕ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ЙОДОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЙОДИРОВАННОЙ СОЛИ

Основным показателем степени дефицита йода в популяции является уровень экскреции йода с мочой в репрезентативной группе населения, проживающего в конкретном регионе. Репрезентативной группой принято считать детей младшего школьного возраста (6–12 лет), сбор материала проводится непосредственно в школах, что обеспечивает необходимую случайность отбора. Оценку проводят на основании величины медианы концентрации йода в моче и доли образцов мочи с уровнем йода менее 50 мкг/л. Вывод об оптимальной обеспеченности делают при условии, что не более 20% образцов мочи имеют уровень йода менее 50 мкг/л.

Выборочные обследования обеспеченности йодом отдельных групп населения по потреблению с пищей и/или экскреции с мочой (йодоурии), проведенные в последние годы, свидетельствуют о сохраняющемся дефиците йода легкой степени тяжести практически на всей территории Российской Федерации. Недостаточное потребление или сниженный уровень йода в моче обнаружены у населения Хабаровского края, Омской области, Мордовии, Республики Саха (Якутия), Воронежской области (Федоренко и др., 2016; Меньщикова и др., 2025; Бекетова и др., 2025; Дуваярова и др., 2025; Волынкина и др., 2025).

Сведения о предупреждающих развитие дефицита йода мерах в различных субъектах РФ носят мозаичный характер, зачастую непродолжительны по времени. Без ежедневного восполнения недостаточного поступления йода путем

использования йодированной соли после завершения даже успешных профилактических мероприятий потребление микроэлемента вновь снижается до уровня, который обеспечивает обычный рацион.

Постепенно накапливается все больше подтверждений того, что регулярное применение йодированной соли в питании детей школьного возраста в течение 6 мес. практически полностью устраняет дефицит этого микроэлемента (Супло-

това и др., 2023, Мустафина и др., 2025). Применение йодированной соли для приготовления школьных завтраков на территории Тюменской области вносит существенный вклад в потребление йода, обеспечивая 23,5–36,9% от рекомендуемой возрастной нормы потребления йода у детей в сельской местности и 15,4–26,4% в городе (Суплотова и др., 2023).

Результаты оценки влияния применения йодированной соли суммированы в табл. 1.

Таблица 1. Влияние использования йодированной соли на обеспеченность детей йодом (Keats et al., 2019; Трошина и др., 2021; Налетов и др., 2023; Дуваярова и др., 2025)

Обследуемые дети, регион	n	Срок	Эффект
Дети 7–10 и 14 лет, Республика Мордовия в организованных коллективах	77 и 67	–	Суточный рацион по сравнению с потреблением обеда 1 раз в сутки – потребление йода ↑ в 1,5 раза
Дети 7–11 лет, Донецкая народная республика, вегетарианский тип питания	65	6 мес.	Экскреция йода с мочой ↑, % детей с экскрецией < 50 мкг/л ↓
Дети 7–11 лет, Донецкая народная республика, смешанное питание	40	6 мес.	Экскреция йода с мочой ↑ % детей с экскрецией < 50 мкг/л ↓
Дети 8–10 лет, Республика Тыва	227	5 лет	Экскреция йода с мочой ↑ до оптимальной, частота зоба ↓ (до 7,7%)
Метаанализ 11 исследований, дети средний возраст 5,7 года	>1000	10 мес. – 6 лет	Частота зоба ↓ на 74%

Примечания: ↓ – уменьшение, ↑ – увеличение.

Использование йодированной соли у детей 7–11 лет, проживающих в Донбассе, сопровождалось повышением экскреции йода с мочой, снижением доли детей с недостаточным потреблением этого микроэлемента как на вегетарианском, так и на смешанном питании (Налетов и др., 2023). Частота обнаружения недостаточного потребления йода среди детей (г. Саранск, Республика Мордовия), получающих питание в школах для одаренных детей с круглосуточным пребыванием, в 1,5 раза реже, чем среди школьников, получающих домашнее питание и обязательное горячее питание 1 раз в день в обычной школе (Дуваярова и др., 2025). В Республике Тыва – регионе с выраженным йодным дефицитом – с 2016 года проводится массовая йодная профилактика: внедрено использование йодированной соли при производстве молочной и хлебобулочной продукции, а доля домохозяйств, применяющих такую соль, увеличилась до 95,2%. По результатам обследования 227 школьников 8–10 лет в 2020 году, в этом регионе установлены оптимальная йодная обеспеченность и сни-

жение частоты выявления зоба до 7,7% (Трошина и др., 2021).

В медицине под результативностью подразумевается благоприятный эффект (положительное соотношение «польза – риск») в ходе клинического исследования, то есть действенность для восполнения существующего дефицита йода, оптимизации йодного статуса организма и устранение нарушений, обусловленных недостатком этого микроэлемента.

Согласно результатам Кохрановского обзора (основанного на анализе 2 рандомизированных контролируемых исследований, 6 нерандомизированных контролируемых исследований, 20 квазиэкспериментальных, 16 когортных, 42 множественных поперечных и 3 исследований со смешанным дизайном), использование в питании йодированной соли восстанавливало адекватную обеспеченность организма йодом (по концентрации йода в моче) приводило к снижению риска развития зоба, уменьшало риск кретинизма и снижения когнитивных функций (Герасимов, 2014).

Результативность характеризует действие йодированной соли в условиях контролируемых исследований, тогда как эффективность показывает, какой эффект достигается при ее применении в обычной (рутинной) практике. Метаанализ 11 проведенных в 2000–2017 гг. крупных зарубежных исследований на репрезентативных выборках детей в возрасте от 10 мес. до 14 лет (средний возраст 5,7 года) по оценке эффективности масштабного (законодательно закрепленного) йодирования пищевой соли в течение от 10 мес. до 6 лет показал снижение частоты развития зоба на 74% (Keats et al., 2019).

Дополнительные меры по устранению йоддефицита в условиях отсутствия обязательного йодирования соли. В условиях отсутствия всеобщего йодирования соли производство обогащенных йодом пищевых продуктов (прежде всего, за счет использования йодированной поваренной соли) является в высшей степени актуальной и действенной профилактической мерой.

1. Учитывая, что эффективность обогащения микронутриентами пищевых продуктов зависит от правильного выбора обогащаемого продукта, то есть его доли в структуре питания, пищевых привычек и степени охвата населения, одним из способов устранения недостатка йода в питании населения является обогащение йодом продукции массового спроса, а именно хлебобулочных изделий.

Хлебобулочная продукция относится к группе товаров ежедневного потребления или массового спроса. Согласно Приказу Минздрава России от 19.08.2016 № 614 (ред. от 01.12.2020) «Об утверждении рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания» норма потребления хлебных продуктов (хлеб и макаронные изделия в пересчете на муку, мука, крупы, бобовые) на душу населения составляет 96 кг в год.

Расчеты показали, что хлеб и хлебобулочные изделия, изготовленные с использованием йодированной соли взамен обычной поваренной соли (по рецептуре 1,5% соли на 100 г муки), по содержанию йода отвечают критериям для обогащенных пищевых продуктов: Техническим регламентам Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» и ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки», согласно которым продукт считается обогащенным при условии, что его усредненная

суточная порция (для хлеба 150 г, для соли – 5 г) содержит не менее 15% (до 50%) минеральных веществ от нормы физиологической потребности человека. В 150 г хлеба (с учетом потерь йода при выпечке до 30%) будет содержаться 53 мкг йода, что соответствует 35% от рекомендуемого суточного потребления этого микроэлемента для взрослых (Коденцова и др., 2011). Таким образом, суммарное потребление за счет йодированной соли и хлеба, изготовленного с ее использованием, обеспечит около 90% от рекомендуемого суточного потребления йода. Хлеб и хлебобулочные изделия, выпеченные с использованием йодированной соли, являются основными источниками йода в странах Восточной Европы и Центральной Азии, в которых приняты законы об обязательном йодировании соли, обеспечивая примерно 32–50% от нормы физиологической потребности в йоде у взрослых лиц. Если бы весь хлеб в Российской Федерации выпекался с йодированной солью, то он обеспечивал бы примерно 37% от потребности в йоде (Герасимов, 2025). Использование соли, обогащенной йодатом калия, способствует улучшению качества хлеба, предупреждению развития картофельной болезни и плесневения, повышению санитарно-микробиологической безопасности хлебобулочных изделий (Костюченко и др., 2003).

Опыт Беларуси показывает, что в результате использования йодированной соли (и/или йодказеина) при производстве хлебобулочных изделий содержание йода в хлебе повысилось в 9 раз с 4,62 мкг/100 г в 2002 г. до 42,02±1,48 мкг/100 г в 2012–2016 гг. (Федоренко и др., 2016). В качестве меры по устранению дефицита йода обязательное использование йодированной соли при выпуске хлебобулочных изделий и других пищевых продуктов применяют во многих странах Западной Европы, США, Австралии и Новой Зеландии.

Представляется целесообразным каждому предприятию хлебопекарной промышленности выпускать хотя бы один сорт обогащенного йодом хлебобулочного изделия. Подтверждение соответствия обогащенной пищевой продукции массового потребления осуществляется в форме декларирования, а не государственной регистрации. Маркировка обогащенной пищевой продукции массового потребления должна соответствовать требованиям Технических регламентов «Пищевая продукция в части ее маркировки» ТР ТС 022/2011, ТР ТС 021/2011.

2. Использование йодированной поваренной соли при приготовлении пищевых продуктов и для досаливания целесообразно в организациях общественного питания, медицинских, дошкольных, образовательных, спортивных, санаторно-курортных организациях, организациях социального обслуживания и системы исполнения наказаний, а также в воинских частях и других организациях. Согласно рекомендациям Международной федерации гинекологии и акушерства FIGO (Federation of Gynecology and Obstetrics) 2019 г., йодированную соль рекомендуется использовать всем беременным и кормящим женщинам (FIGO Committee Report, 2019). Концентрация йода в грудном молоке зависит от поступления йода с пищей матери. При недостатке йода в рационе матери у ребенка, получающего исключительно грудное вскармливание, возникает дефицит этого микроэлемента. В странах, осуществляющих программу обязательного йодирования соли, использование йодированной соли взамен обычной обеспечивает достаточное количество йода для кормящих женщин и через грудное молоко, содержание йода в котором достигает 117–155 мкг/л, обеспечивает потребность их младенцев (Коденцова, 2021).

3. Для обеспечения эффективной профилактики йододефицитных состояний, представляется важным повышение информированности различных групп населения о последствиях дефицита йода с целью повышения мотивации к использованию йодированной соли в питании, а также

разработка систематических образовательных программ по обучению основам профилактики заболеваний, вызванных дефицитом йода, для разных возрастных групп населения. Так, в ходе анкетирования 678 человек в Воронежской области выяснилось, что лишь половина учителей и менее 1/3 школьников знают, что они проживают на территории с йододефицитом, а 18% школьников не знают о существовании йодированной соли (Цуркан, 2022).

4. В качестве носителя йода могут выступать получившие широкое распространение в питании населения пищевые концентраты, а именно бульонные кубики, смеси специй, содержание соли в которых может достигать 80% (Шатнюк и др., 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Йододефицитные состояния характерны для всех групп населения в России. Йододефицитные состояния полностью предотвратимы только при проведении популяционной профилактики йодированной солью (использование ее в питании, в том числе в пищевой промышленности).

В России главной причиной не достижения цели устранения дефицита йода в питании населения и связанных с ним заболеваний является отсутствие закона о профилактике йододефицитных состояний. Добровольная модель потребления йодированной соли не оказывает должного эффекта по ликвидации йодного дефицита и не соответствует международной практике.

ЛИТЕРАТУРА

- Агаева Л.З., Аммосова А.М., Степанова Л.А. Йододефицитные состояния и пути профилактики в Российской Федерации и Республике Саха (Якутия). Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. Серия «Медицинские науки». 2022; (2): 26–38.
- Алфёрова В.И., Мустафина С.В., Рымар О.Д. Йодная обеспеченность в России и мире: что мы имеем на 2019 год? Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2019; 15(2): 73–82; <https://doi.org/10.14341/ket10353>.
- Бекетова Н.А., Вржесинская О.А., Кошелева О.В., Лебедева У.М., Жилинская Н.В. Обеспеченность йодом и витаминами, показатели состава тела коренных жителей пожилого возраста Республики Саха (Якутия). Вопросы питания. 2025; 94(5): 159–170; <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-5-159-170>.
- Белых Н.А. Йододефицитные заболевания: история и реальность. Міжнародний журнал педіатрії, акушерства та гінекології. 2018; 12(4): 6–14.
- Вольнкина А.П., Трошина Е.А., Маколина Н.П., Самофалова О.В., Бабий Н.В. Оценка йодной обеспеченности женщин в первом триместре беременности, проживающих в районах Проблемы эндокринологии. 2025; 71(5): 4–9. DOI: <https://doi.org/10.14341/probl13646>.
- Герасимов Г.А. Воспоминания о будущем. Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2019; 15(3): 90–95.
- Герасимов Г.А. О рекомендациях ВОЗ «Обогащение пищевой соли йодом для профилактики заболеваний, вызванных дефицитом йода». Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2014; 10(4): 5–8; <https://doi.org/10.14341/ket201445-8>.
- Герасимов Г.А. Тайна бульонных кубиков. Комментарий к статье «Эпидемиологические исследования йодного дефицита у подростков в г. Новосибирске: данные 15-летнего наблюдения». Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2025; 21(2): 11–13; <https://doi.org/10.14341/ket12835>.
- Дедов И.И., Мельниченко Г.А., Трошина Е.А., Платонова Н.М., Абдулхабирова Ф.М., Шатнюк Л.Н., Апанасенко Б.П., Кавтарадзе С.Р., Арбузова М.И., Джатоева Ф.А. Дефицит йода – угроза здоровью и развитию детей России. Пути решения проблемы. Национальный доклад. М.: Детский фонд ООН (ЮНИСЕФ) в РФ. 2006. 124 с.

Дуваева Т.М., Балыкова Л.А., Ледяйкина Л.В., Ямашкина Е.И., Балыкова О.П., Верещагина В.С., Чернова Н.Н., Есина М.В. Влияние нутритивного статуса на параметры физического развития и некоторые аспекты состояния здоровья школьников Республики Мордовия. *Медицина и биотехнологии*. 2025; 1(4): 383–395; <https://doi.org/10.15507/3034-6231.001.202504.383-395>.

Коденцова В.М., Вржесинская О.А., Батурин А.К. Оценка максимально возможного поступления йода за счет йодированной соли и хлебобулочных изделий массового потребления, изготовленных с ее использованием. *Микроэлементы в медицине*. 2011; 12(3–4): 43–47.

Коденцова В.М., Вржесинская О.А., Рисник Д.В. Анализ отечественного и международного опыта использования обогащенных микроэлементами пищевых продуктов и йодирования соли. *Микроэлементы в медицине*. 2015; 16(4): 3–20.

Коденцова В.М., Рисник Д.В., Павлович С.В., Ладодо О.Б. Оптимизация обеспеченности микронутриентами кормящих женщин и новорожденных на исключительно грудном вскармливании посредством обогащения рациона женщины. *Гинекология*. 2021; 23 (3): 222–230. DOI: 10.26442/20795696.2021.3.200875.

Костюченко М.Н., Цыганова Т.Б., Шатнюк Л.Н. Системный подход к обогащению хлебобулочных изделий йодом. *Хлебопечение России*. 2003; (1): 11–13; (2): 34–35.

Мельниченко Г.А., Герасимов Г.А., Трошина Е.А. Что мешает принять закон о профилактике заболеваний, вызванных дефицитом йода, в стране с йодной недостаточностью? *Клиническая и экспериментальная тиреоидология*. 2019; 15(4): 162–168; <https://doi.org/10.14341/ket12424>.

Мельниченко Г.А., Трошина Е.А., Платонова Н.М., Панфилова Е.А., Рыбакова А.А., Абдулхабирова Ф.М., Бостанова Ф.А. Йоддефицитные заболевания щитовидной железы в Российской Федерации: современное состояние проблемы. Аналитический обзор публикаций и данных официальной государственной статистики (Росстат). *Consilium Medicum*. 2019; 21(4): 14–20; <https://doi.org/10.26442/20751753.2019.4.190337>.

Меньщикова Ю.В., Вильмс Е.А., Турчанинов Д.В., Козубенко О.В., Брусенцова А.В., Турчанинова М.С., Юнацкая Т.А., Глаголева О.Н., Чубарова А.Д. Гигиеническая оценка эффективности реализации федерального проекта «Укрепление общественного здоровья» в части формирования приверженности здоровому питанию взрослого населения Омской области в 2018–2023 гг. *Вопросы питания*. 2025; 94(1): 71–81; <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-1-71-81>.

Мустафина С.В., Рымар О.Д., Алфёрова В.И., Денисова Д.В. Эпидемиологические исследования йодного дефицита у подростков в г. Новосибирске: данные 15-летнего наблюдения. *Клиническая и экспериментальная тиреоидология*. 2025; 21(2): 4–10; <https://doi.org/10.14341/ket12831>.

Налетов А.В., Свистунова Н.А., Масюта Д.И. Оценка йодной обеспеченности детей-вегетарианцев. *Вопросы диетологии*. 2023; 13(1): 17–20; <https://doi.org/10.20953/2224-5448-2023-1-17-20>.

Рисник Д.В., Коденцова В.М., Орлова С.В., Никитина Е.А. Проблемы микронутриентной обеспеченности детей и их решение в странах СНГ: сравнительный аспект. *Медицинский алфавит*. 2025; 1(19): 14–21; <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-19-14-21>.

Сенькевич О.А., Ковальский Ю.Г., Рябцева Е.Г., Пикалова В.М. Мониторинг обеспеченности йодом населения г. Хабаровска. *Дальневосточный медицинский журнал*. 2018; (4): 32–37.

Суплотова Л.А., Герасимов Г.А., Трошина Е.А., Макарова О.Б., Денисов П.М., Зайдулина А.С., Шаруха Г.В. Оценка потребления йода с йодированной солью в организованном питании детей дошкольного и школьного возраста в Тюменской области. *Вопросы питания*. 2023; 92(4): 29–37; <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-4-29-37>.

Трошина Е.А. Устранение дефицита йода – забота о здоровье нации. Экскурс в историю, научные аспекты и современное состояние правового регулирования проблемы в России. *Проблемы эндокринологии*. 2022; 68(4): 4–12; <https://doi.org/10.14341/probl13154>.

Трошина Е.А., Маколина Н.П., Сеньюшкина Е.С., Никанькина Л.В., Малышева Н.М., Фетисова А.В. Йоддефицитные заболевания: текущее состояние проблемы в Брянской области. *Проблемы эндокринологии*. 2021; 67(4): 84–93; <https://doi.org/10.14341/probl12793>.

Федоренко Е.В., Шуляковская О.В., Войтенко С.И., Авсянкина И.О., Бельшева Л.Л., Коломиец Н.Д. Гигиеническая оценка содержания йода в пищевой продукции в Республике Беларусь. *Здоровье и окружающая среда*. 2016; (26): 159–162.

Цуркан А.А. Информированность разных групп населения в Воронежской области о дефиците йода и методах его предупреждения. *Молодежный инновационный вестник*. 2022. 11 (S1): 97–100.

Шатнюк Л.Н., Вржесинская О.А., Коденцова В.М., Матвеева А.Е. Перспективы повышения витаминной ценности пищевых концентратов – бульонных кубиков. *Техника и технология пищевых производств*. 2020; 50(2): 296–305; <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-296-305>.

Brough L., Skeaff S. Iodine. *Adv Nutr*. 2024; 15(2): 100168; <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2024.100168>.

FIGO Committee Report. Good clinical practice advice: Micronutrients in the periconceptional period and pregnancy. *Int J Gynecol Obstet*. 2019; 144: 317–321; <https://doi.org/10.1002/ijgo.12739>.

Keats E.C., Neufeld L.M., Garrett G.S., Mbuya M.N., Bhutta Z.A. Improved micronutrient status and health outcomes in low- and middle-income countries following large-scale fortification: evidence from a systematic review and meta-analysis. *Am J Clin Nutr*. 2019; 109(6): 1696–1708; <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz023>.

Manousou S., Johansson B., Chmielewska A., Eriksson J., Gutefeldt K., Tornhage C.-J., Eggertsen R., Malmgren H., Hulthen L., Domellöf M., Nystrom Filipsson H. Role of iodine-containing multivitamins during pregnancy for children's brain function: protocol of an ongoing randomised controlled trial: the SWIDDICH study. *BMJ Open*. 2018; 8(4): e019945; <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-019945>.

Sorrenti S., Baldini E., Pironi D., Lauro A., D'Orazi V., Tartaglia F., Tripodi D., Lori E., Gagliardi F., Praticò M., Illuminati G., D'Andrea V., Palumbo P., Ulisse S. Iodine: Its Role in Thyroid Hormone Biosynthesis and Beyond. *Nutrients*. 2021; 13(12): 4469; <https://doi.org/10.3390/nu13124469>.

Информация об авторах:

Дмитрий Владимирович Рисник – к.б.н., биологический факультет
ORCID: 0000-0002-3389-8115; SPIN: 4631-2230

Вера Митрофановна Коденцова – д.б.н., профессор, гл. науч. сотрудник
лаборатории витаминов и минеральных веществ
E-mail: kodentsova@ion.ru; ORCID: 0000-0002-5288-1132; SPIN: 8470-1211

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

IODINE DEFICIENCY IN RUSSIA: A PREVENTABLE, BUT NOT SOLVED, PROBLEM

D.V. Risnik¹, V.M. Kodentsova²

¹ Moscow State University M.V. Lomonosov;
Lenin Hills, d. 1, page 12, Moscow, 119234, Russian Federation

² Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety;
Ustyinskiy proezd, d. 2/14, Moscow, 109240, Russian Federation

ABSTRACT. Insufficient iodine intake from food is the cause of iodine deficiency disorders and associated diseases.

The aim of the study is to characterize the state of iodine availability of the population and evaluate the measures taken to eliminate iodine deficiency.

Mild iodine deficiency disorders are common among all population groups in Russia. Iodine deficiency is considered resolved when at least 90% of households consume iodized salt, but in Russia this proportion is approximately 30%. The vast majority of countries with documented iodine deficiency have adopted salt iodization legislation. A meta-analysis of the results of mandatory salt fortification demonstrated a 74% reduction in goiter incidence. In Russia, work on a law on the prevention of iodine deficiency disorders has been underway for nearly a quarter of a century. Voluntary salt iodization and food fortification are being implemented at the initiative of manufacturers. Since 2020, SanPiN 2.3/2.4.3590-20 have been implemented in the Russian Federation, regulating the mandatory use of iodized salt for preparing meals in organized children's meals. Several studies have confirmed the effectiveness of this measure in increasing iodine intake and increasing iodouria. Due to insufficient knowledge about the role of adequate iodine supply in maintaining health, the population does not make an informed choice of iodized salt.

Conclusion. Iodine deficiency disorders are completely preventable only through population-wide prevention with iodized salt (its use in the diet, including in the food industry). In Russia, the main reason for the failure to eliminate iodine deficiency in the population's diet and associated diseases is the lack of a law on the prevention of iodine deficiency disorders. In the absence of a law on the universal iodization of table salt, it is advisable to use it in baking bread and bakery products and in the production of certain food concentrates to ensure greater population coverage. To raise awareness among various population groups about the consequences of iodine deficiency and increase motivation to use iodized salt in their diets, it is necessary to develop systematic educational programs for different age groups. The experience of using iodized salt in educational institutions should be expanded to other organized groups.

KEYWORDS: iodine, iodouria, iodine deficiency, iodized salt, food products, food fortification.

For citation: Risnik D.V., Kodentsova V.M. Iodine deficiency in Russia: a preventable, but not solved, problem. *Trace elements in medicine*. 2026;27(1):3–12. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-3-12

REFERENCES

Ageeva L.Z., Ammosova A.M., Stepanova L.A. Iodine deficiency and ways of prevention in the Russian Federation and the Republic of Sakha (Yakutia). *Vestnik Severo-Vostochnogo Federalnogo Universiteta imeni M.K. Ammosova. Seriya "Meditsinskie nauki"*. 2022; (2): 26–38. (In Russian).

Alferova V.I., Mustafina S.V., Rymar O.D. Iodine status of the population in Russia and the world: what do we have for 2019? *Clinical and Experimental Thyroidology*. 2019; 15(2): 73–82. (In Russian); <https://doi.org/10.14341/ket10353>.

Beketova N.A., Vrzhesinskaya O.A., Kosheleva O.V., Lebedeva U.M., Zhilinskaya N.V. Iodine and vitamin status, body composition in older persons living in the Republic of Sakha (Yakutia). *Problems of Nutrition*. 2025; 94(5): 159–170. (In Russian); <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-5-159-170>.

- Belykh N.A. Iodine-deficiency diseases: history and reality. *Mizhnarodnyi Zhurnal Pediatrii, Akusherstva ta Hinekologii*. 2018; 12(4): 6–14. (In Russian).
- Volynkina AP, Troshina EA, Makolina NP, Samofalova OV, Babii NV. The assessment of iodine sufficiency in women in the first trimester of pregnancy living in areas of the Voronezh region with varying levels of iodine consumption. *Problems of Endocrinology*. 2025; 71(5): 4–9. DOI: <https://doi.org/10.14341/probl13646>.
- Gerasimov G.A. Memories of the future. *Clinical and Experimental Thyroidology*. 2019; 15(3): 90–95. (In Russian).
- Gerasimov G.A. On WHO Guidelines “Fortification of food grade salt for the prevention of iodine deficiency disorders”. *Clinical and Experimental Thyroidology*. 2014; 10(4): 5–8. (In Russian); <https://doi.org/10.14341/ket201445-8>.
- Gerasimov G.A. The mystery of bouillon cubes. Comments to the article “Epidemiological studies of iodine deficiency in adolescents in Novosibirsk: data from a 15-year observation”. *Clinical and Experimental Thyroidology*. 2025; 21(2): 11–13. (In Russian); <https://doi.org/10.14341/ket12835>.
- Dedov I.L., Melnichenko G.A., Troshina E.A., Platonova N.M., Abdulkhabirova F.M., Shatnyuk L.N., Apanasenko B.P., Kavtaradze S.R., Arbuzova M.I., Dzhatoeva F.A. Iodine deficiency – a threat to the health and development of children in Russia. Ways of solving the problem: national report. Moscow: Detskiy fond OON (UNICEF) v RF; 2006. 124 p. (In Russian).
- Duvayarova T.M., Balykova L.A., Ledyaykina L.V., Yamashkina E.I., Balykova O.P., Vereshchagina V.S., Chernova N.N., Esina M.V. Nutritional status and its association with physical development and health indicators in schoolchildren of the Republic of Mordovia. *Medicine and Biotechnology*. 2025; 1(4): 383–395. (In Russian); <https://doi.org/10.15507/3034-6231.001.202504.383-395>.
- Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A., Baturin A.K. Estimation of the maximal possible intake of iodine from iodized salt and mass-consumption bakery products made with its use. *Trace Elements in Medicine*. 2011; 12(3–4): 43–47. (In Russian).
- Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A., Risnik D.V. The analysis of domestic and international policy of food fortification with trace elements and salt iodization. *Trace Elements in Medicine*. 2015; 16(4): 3–20. (In Russian).
- Kodentsova V.M., Risnik D.V., Pavlovich S.V., Ladodo O.B. Optimization of the micronutrients sufficiency of feeding women and children on exclusively breastfeeding by enriching of the woman diet. *Gynecology*. 2021; 23(3): 222–230. DOI: 10.26442/20795696.2021.3.200875.
- Kostyuchenko M.N., Tsyganova T.B., Shatnyuk L.N. A systematic approach to the enrichment of bakery products with iodine. *Khlebopechenie Rossii*. 2003; 1: 11–13; 2: 34–35. (In Russian).
- Melnichenko G.A., Gerasimov G.A., Troshina E.A. What prevents passing the law about prevention of iodine deficiency disorders in the country with iodine deficiency? *Clinical and Experimental Thyroidology*. 2019; 15(4): 162–168. (In Russian); <https://doi.org/10.14341/ket12424>.
- Melnichenko G.A., Troshina E.A., Platonova N.M., Panfilova E.A., Rybakova A.A., Abdulkhabirova F.M., Bostanova F.A. Iodine deficiency thyroid disease in the Russian Federation: the current state of the problem. Analytical review of publications and official state statistics (Rosstat). *Consilium Medicum*. 2019; 21(4): 14–20. (In Russian); <https://doi.org/10.26442/20751753.2019.4.190337>.
- Menshchikova Yu.V., Vilms E.A., Turchaninov D.V., Kozubenko O.V., Brusentsova A.V., Turchaninova M.S., Yunatskaya T.A., Glagoleva O.N., Chubarova A.D. Hygienic assessment of the effectiveness of the Federal Project “Strengthening public health” in forming commitment to healthy nutrition among the adult population of the Omsk region in 2018–2023. *Problems of Nutrition*. 2025; 94(1): 71–81. (In Russian); <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-1-71-81>.
- Mustafina S.V., Rymar O.D., Alferova V.I., Denisova D.V. Epidemiological studies of iodine deficiency in adolescents in Novosibirsk: data from a 15-year observation. *Clinical and Experimental Thyroidology*. 2025; 21(2): 4–10. (In Russian); <https://doi.org/10.14341/ket12831>.
- Naletov A.V., Svistunova N.A., Masyuta D.I. Assessment of iodine provision in vegetarian children. *Problems of Dietetics*. 2023; 13(1): 17–20. (In Russian); <https://doi.org/10.20953/2224-5448-2023-1-17-20>.
- Risnik D.V., Kodentsova V.M., Orlova S.V., Nikitina E.A. Problems of micronutrient provision of children and their solutions in the CIS countries: a comparative aspect. *Medical Alphabet*. 2025; 1(19): 14–21. (In Russian); <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-19-14-21>.
- Senkevich O.A., Kovalskiy Yu.G., Ryabtseva E.G., Pikalova V.M. Monitoring of iodine supply in the population of Khabarovsk. *Dalnevostochnyy Meditsinskiy Zhurnal*. 2018; (4): 32–37. (In Russian).
- Suplotova L.A., Gerasimov G.A., Troshina E.A., Makarova O.B., Denisov P.M., Zaydulina A.S., Sharukho G.V. Assessment of iodine intake with iodized salt in organized nutrition of preschool and school-age children in the Tyumen region. *Problems of Nutrition*. 2023; 92(4): 29–37. (In Russian); <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-4-29-37>.
- Troshina E.A. Elimination of iodine deficiency is a concern for the health of the nation. An excursion into history, scientific aspects and the current state of legal regulation of the problem in Russia. *Problems of Endocrinology*. 2022; 68(4): 4–12. (In Russian); <https://doi.org/10.14341/probl13154>.
- Troshina E.A., Makolina N.P., Senyushkina E.S., Nikankina L.V., Malysheva N.M., Fetisova A.V. Iodine deficiency disorders: current state of the problem in the Bryansk region. *Problems of Endocrinology*. 2021; 67(4): 84–93. (In Russian); <https://doi.org/10.14341/probl12793>.
- Fedorenko E.V., Shulyakovskaya O.V., Voytenko S.I., Avsyankina I.O., Belysheva L.L., Kolomiets N.D. Hygienic assessment of iodine content in food products in the Republic of Belarus. *Health and Environment*. 2016; (26): 159–162. (In Russian).
- Tsurkan A.A. Awareness of Different Population Groups in the Voronezh Region about Iodine Deficiency and Methods of Its Prevention. *Youth Innovation Bulletin*. 2022. 11 (S1): 97–100.

Shatnyuk L.N., Vrzhesinskaya O.A., Kodentsova V.M., Matveeva A.E. Prospects for increasing the vitamin value of food concentrates – bouillon cubes. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020; 50(2): 296–305. (In Russian); <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-296-305>.

Brough L., Skeaff S. Iodine. *Advances in Nutrition*. 2024; 15(2): 100168; <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2024.100168>.

FIGO Committee Report. Good clinical practice advice: Micronutrients in the periconceptional period and pregnancy. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*. 2019; 144: 317–321; <https://doi.org/10.1002/ijgo.12739>.

Keats E.C., Neufeld L.M., Garrett G.S., Mbuya M.N., Bhutta Z.A. Improved micronutrient status and health outcomes in low- and middle-income countries following large-scale fortification: evidence from a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2019; 109(6): 1696–1708; <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz023>.

Manousou S., Johansson B., Chmielewska A., Eriksson J., Gutefeldt K., Tornhage C.-J., Eggertsen R., Malmgren H., Hulthen L., Domellöf M., Nystrom Filipsson H. Role of iodine-containing multivitamins during pregnancy for children's brain function: protocol of an ongoing randomised controlled trial: the SWIDDICH study. *BMJ Open*. 2018; 8(4): e019945; <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-019945>.

Sorrenti S., Baldini E., Pironi D., Lauro A., D'Orazi V., Tartaglia F., Tripodi D., Lori E., Gagliardi F., Praticò M., Illuminati G., D'Andrea V., Palumbo P., Ulisse S. Iodine: Its Role in Thyroid Hormone Biosynthesis and Beyond. *Nutrients*. 2021; 13(12): 4469; <https://doi.org/10.3390/nu13124469>.

Information about the authors:

D.V. Risnik – Ph.D. (Biol.), Faculty of Biology
ORCID: 0000-0002-3389-8115; SPIN: 4631-2230

V.M. Kodentsova – Dr.Sc. (Biol.), Professor, Chief Research Scientist of the Laboratory of Vitamins and Minerals
E-mail: kodentsova@ion.ru; ORCID: 0000-0002-5288-1132; SPIN: 8470-1211

Conflict of interest

The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Поступила 28 января 2026 года
Принята к публикации 27 февраля 2026 года

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

THE ROLE OF ESSENTIAL AND TOXIC ELEMENTS IN THE DEVELOPMENT OF PROSTATE CANCER: COMPREHENSIVE ANALYSIS AND PROSPECTS. REPORT 1. BIOLOGICAL ASPECTS

**M.B. Hussain¹, K. Zaidi², I.I. Lapin^{1,3*}, D.M. Lyapunovsky³, A.V. Skalny^{1,3},
E.A. Bezrukov¹, V.I. Torshin³, A.E. Severin³**

¹ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenovskiy University);
Trubetskay Street 8 building 2, Moscow, 119991, Russian Federation

² Lahore General Hospital;
Lahore, 540000, Islamic Republic of Pakistan

³ People's Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University);
Mikluho-Maklay Street 6, Moscow, 117198, Russian Federation

ABSTRACT. Prostate cancer (PCa) continues to be one of the leading non-communicable diseases worldwide, the development of PCa is increasingly attributed to the combination of essential & toxic elements. This article reviews current epidemiology, mechanisms, and analytical data regarding the role of Zinc (Zn); Selenium (Se); copper (Cu); Cadmium (Cd); Arsenic (As); Lead (Pb); and many other trace elements in pathology related to PCa. Essential elements such as Zn and Se promote antioxidant defense systems, DNA repair & apoptosis, and metabolism of Citrate, while toxic metals like Cd, As, Pb, and excessive Cu increase the incidence of oxidative stress, endocrine dysfunction, genomic instability, and inflammation associated with PCa initiation and progression. The importance of multi-element Interactions, particularly antagonistic interactions such as Zn & Cd or Se & As is emphasized when developing exposomic strategies for evaluating mixture-factor effects.

Advances in the use of IS-MS for non-invasive biomonitoring of hair and nails provide a reliable method for determining the long-term effects of multiple trace elements in different geographical areas. It has been demonstrated that the elemental imbalance associated with the development and aggressiveness of PCa depends on the geographical context. The data obtained confirm the need to integrate environmental exposure profiles with cellular and molecular pathways to improve prevention strategies, develop more accurate disease biomarkers, and implement effective public health measures. New approaches to diagnosis are needed, as well as technologies for early risk detection and prevention of PCa that are accessible to developing countries.

KEYWORDS: prostate cancer, trace elements, zinc, selenium, cadmium, arsenic, copper.

For citation: Hussain M.B., Zaidi K., Lapin I.I., Lyapunovsky D.M., Skalny A.V., Bezrukov E.A., Torshin V.I., Severin A.E. The role of essential and toxic elements in the development of prostate cancer: comprehensive analysis and prospects. Report 1. Biological aspects. Trace elements in medicine. 2026;27(1):13–23. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-13-23

PROSTATE CANCER: SCOPE, BURDEN AND ETIOLOGIC INSIGHTS

Prostate cancer has become the most common cancer diagnosis in men and remains one of the most common to cause morbidity and mortality in older men. Globally, there is great variability in the incidence and mortality rate of PCa and this is partially due to differences in population screening, demographics, environmental and lifestyle factors (Bergengren et al., 2022; Crocetto et al., 2023). While age, family history and race/ethnicity are the most frequently documented risk factors of prostate

cancer, the hereditary breast and ovarian cancer genes BRCA2 and HOXB13 are included as part of the greatest number of risk factors but do not account for the wide disparities seen throughout the world in terms of incidence rates, stage of diagnosis, and disease aggressiveness of prostatic carcinoma (Rawla, 2019; Pang et al., 2025). This has led to investigations over the past decade on PCa modifiable environmental risk factors.

Currently, the prolonged chronic effect of both toxic (Cadmium, Lead, Arsenic, and Mercury) and essential (Zinc, Selenium, and Copper) trace ele-

* Адрес для переписки:

Lapin Ilya Igorevich

E-mail: lapin_i_i@staff.sechenov.ru

ments on PCa pathology has become biologically plausible. This is due to the role of these elements in redox regulation, DNA repair, hormonal action, and immune response (Górska et al., 2024; Zhou et al., 2025). An extensive systematic review and meta-analysis of trace elements levels in the serum of patients with PCa notes that those with PCa had homeostatic imbalances of Selenium (Se) and copper (Cu), with significantly lower Se levels and higher Cu levels when compared to controls. (Devi et al., 2025). Tshoni et al. (2024) even more integrated and expanded in their mechanistic review of trace metals and PCa, and stated that zinc (Zn) and Se deficiencies coupled with greater exposures to cadmium (Cd), arsenic (As), nickel (Ni), and lead (Pb), may disrupt genomic stability and epigenetic regulation and the transcriptomic and proteomic network of prostate tissue.

In recent study it was evaluated that several metals in tissue, urine, and serum of patients with PCa, noted the presence of Cd and As in higher amounts in the cancerous compared to the non-cancerous adjacent tissue (Tyagi et al., 2023). Also related data from Nigeria, suggesting that among men, higher urinary Cd was linked with PCa (adjusted OR ~2.5 per ten-fold increase), which was modified by Zn status and was strongest among men in the bottom quartile for Zn status (Bede-Ojimadu et al., 2023).

Additionally, recent investigations have provided a detailed reassessment of the role of Se in PCa, highlighting the intricate relationship between Se status, selenoprotein function, and tumor biology. According to Jiang et al. (2023), observational studies have consistently suggested an inverse association between Se levels and PCa risk, implying that adequate Se intake may contribute to prevention or slower disease progression. However, large-scale randomized controlled trials evaluating Se supplementation have yielded conflicting results, indicating no significant protective effect against PCa (HR \approx 0.95; 95% CI: 0.80–1.13). This proves the relationship's complexity due to variations in Se dose, chemical form and timing of intake, interactions with other trace elements, and selenoprotein genetic polymorphisms. Moreover, supplementation may not account for the biologically active context of endogenous exposure to Se, which reiterates the need to examine the context of Se for possible cancer prevention and treatment (Jiang et al., 2023).

After above discussion, the evidence presents a balanced argument where trace elements exposures, i.e., low exposures to protective elements and high

exposures to toxic metals, could be suspected to contribute to cancer and PCa cancer progression. This could, to an extent, account for some of the variation in disease burden related to cancer in different regions and populations. Nonetheless, the evidence heterogeneity, the challenges to assess exposure and the possible genetic or dietary moderator complexity, raise the necessity of new research involving stronger designs, exposure assessment and mechanistic studies in this field.

BIOLOGICAL IMPORTANCE OF TRACE ELEMENTS IN PROSTATE CANCER DEVELOPMENT

The prostate has a distinct method of handling metals, specifically Zn, among other metal ions, in connection to prostate cancer. Zn has a role in apoptosis (cell death) and proliferation within prostate cancer growth, the prostate processes citrate and stores Zn; when Zn is deficient in the prostate, this perturbation of normal apoptosis can lead to excessive proliferation of prostate cells. In other words, Zn deficiency is thought to be a factor in the uncontrolled proliferation of cancerous prostate cells (Karunasinghe, 2022; Shahrokhi et al., 2024). Se deficiency causing unregulated oxidative DNA damage and redox imbalance leads to uncontrolled cell proliferation, and, in addition, assists in the establishment of other cancer hallmarks. On the other hand, Castrate-resistant prostate cancer (CRPC), Cd and As, cause oxidative stress, contributed to epigenetic reprogramming, and alteration of metalloproteins with the maze of oxygen (Zhan et al., 2025). All these highlighted characteristics make Cd pro-carcinogenic in the experimental settings. Apart from the uncharacteristic attributes of other trace elements, Cd exposure correlates to higher risk of developing PCa in epidemiological studies (Devi et al., 2024).

Like uncharacterized attributes of Cu, Fe also poses troubling pro-carcinogenic attributes. Dysregulated Fe compounds reactive species, angiogenesis, and cell proliferation (Bede-Ojimadu 2023). Interactions among uncharacterized bio-elements that function as both "essential" (e.g., Zn and Se) and "toxic" (e.g., Cd, As, and excess amounts of Cu and Fe) provide significant mechanistic information for the way in which the potential development of PCa can be initiated by these bio-elements.

A review and meta-analysis by Devi have determined that Cu levels in serum of PCa patients was found to be significantly greater and Se was found to be lower in comparison with the control group (SMD = +1.85 Cu; SMD = -2.45 Se) showing that

elements in the body changed during the disease process (Devi et al., 2025). Another important review concerning Zn and PCa stated, Zn levels in both the serum (SMD of -1.11) and prostatic fluid/tissue (SMD -3.70) were significantly lower, thus suggesting that Zn deficiency is a constant attribute in PCa (Shahrokhi et al., 2024). In a case-control study done on Nigerian men, each increase of ten times urinary Cd concentration was connected to a disease adjusted odds as significant as 2.53, and men with a lower portion of Zn had even stronger connection of 8.46 (Bede-Ojimadu et al., 2023). Cd and As concentrations were measured and found greater in tumor tissue than in non-tumor tissue and even adjacent non-tumor tissue (Karunasinghe et al., 2022).

Mechanisms of actions include the removal of Zn, loss of apoptotic restraint and cellular shift to glycolysis, proliferation metabolism; loss of Se encourages loss of redox homeostasis and impairs DNA repair; Cd sharing Zn binding sites, disrupting Zn cellular proteins, miRNA dysregulation, and hormonal pathway mimicry; Cu and Fe promoting Relative Oxygen Species (ROS) for proliferation and angiogenesis (Tshoni et al., 2024). In summary, uncontrolled trace elements physiology comprising deficiency of protective and exposure to metallotoxicity unfolds dysregulation and factors of disparate burden of PCa. To be able to help advance these findings into preventative or therapeutic strategies, further longitudinal studies with a focus on exposure assessment, multi metal interaction modelling, and integrating genetic and epigenetic controls is necessary.

POTENTIAL BIOLOGICAL PATHWAYS LINKING TRACE ELEMENTS TO PROSTATE PATHOLOGY

Pathogenesis of PCa is complicated by genetic, hormonal and environmental factors; within these complexities, trace elements (both essential and toxic) are being evaluated mechanistically. As discussed by Tshoni et al., essential and toxic metals modulate prostate carcinogenesis through mechanisms including oxidative stress, DNA damage, inflammation, hormone interference, and disruption of metal homeostasis (Tshoni et al., 2024).

Oxidative Stress and DNA Damage. One of the most documented ways that trace elements may influence prostate disease is through oxidative stress which leads to DNA damage. Redox-active metals (e.g. Fe, Cu, As, Cd) can catalyze the formation of reactive oxygen species (ROS), which can lead to base damage (e.g., 8-oxo-2'-deoxyguanine), single-

strand or double-strand breaks in DNA. For instance, Pizent et al. (2022) showed correlations between blood Cd and Hg levels and oxidative stress markers in men with PCa, suggesting a relationship between metal burden and the initiation of oxidative stress. Likewise, Tyagi et al. (2023) determined the Cd and As levels were greater in PCa patients compared to controls, furthering support for toxic metal exposure driving oxidative insults in prostate tissue.

Oxidative stress not only initiates carcinogenic changes through mutagenesis, but could also be associated with tumor progression through contributions to genomic instability. Therefore, accumulation of oxidative DNA lesions may overwhelm repair pathways and promote selection of cells that grow better with DNA damage (Pizent et al., 2022). Thus, biomarker measurement of 8-oxo-dG, lipid peroxidation products (e.g., malondialdehyde, 4-HNE), or altered antioxidant enzyme activities (e.g., SOD, GPx) in conjunction with metal exposures may provide mechanistic linkage between exposure and pathology of the prostate (Kanwal et al., 2012).

Disruption of DNA Repair & Chromatin Regulation. In addition to adverse effects on direct DNA, trace elements potentially interfered with DNA repair systems and epigenetic regulation. For example, Zn is a structural component of several DNA-binding and repairing proteins; depriving Zn may disrupt these systems. In his mini review, Karunasinghe (2022) highlighted the role of Zn in prostate health and suggested altered Zn homeostasis may lead to an impaired DNA repair in prostate cells. Cd can substitute for Zn in Zn-binding proteins, impairing their activity and disrupting epigenetic regulation. These disruptions may lead to altered chromatin structure, leading to aberrant gene expression, both of which are indicators of carcinogenicity. Furthermore, the studies by Tshoni et al. (2024) suggest that the metal-dependent enzymes and epigenetic modifiers may facilitate the transition from exposure to malignant change in the prostate.

Endocrine or Hormonal Modulation. The prostate is regulated by hormones and is sensitive to androgens; therefore, metals that mimic or interfere with steroid metabolism may affect prostate carcinogenicity. For example, Cd has been described as a "metallo-estrogen" that can mimic estrogenic action or disrupt androgen receptor signalling. This disruption may lead to proliferation of prostate cells. As described by Tshoni et al. the endocrine disruption pathway is a potential mechanism linking trace metal exposure and pathogenesis of prostate tumors (Tshoni

et al., 2024). Integrating such biomarkers as androgen receptor expression, testosterone/dihydrotestosterone ratios, and circulating hormones with trace elements may elucidate this pathway.

Inflammation and Immune Regulation.

Chronic metal exposure can also result in chronic inflammation, increased pro-inflammatory cytokines (e.g., IL-6, TNF- α) and alterations in the local prostate ecosystem that facilitate tumor growth. Metals, such as As, Cd or Pb, may initiate cytokine shifts and trigger macrophage activation to produce reactive nitrogen species to create an inflamed pro-tumor microenvironmental. The inflammation of the prostate might then enable malignant transformation or progression, especially in older men with latent prostate disease. Recently published mechanistic reviews emphasized inflammation as one of the connected pathways that metals promote prostate pathology (Tshoni et al., 2024).

Interference with essential metals Homeostasis. Trace elements pathology in the prostate includes disturbances of essential metallic homeostasis, in particular Zn and Se. Zn is uniquely concentrated in the normal prostate and facilitates citrate metabolism, regulation of cell-apoptosis, and antioxidant defences. With disturbed Zn homeostasis due to deficiency, or displacing it with Cd, prostate cells lose critical inhibitory control over proliferation and apoptosis (Karunasinghe, 2022; Tshoni et al., 2024) Se is central to antioxidant protection and DNA repair when incorporated into selenoprotein (e.g., glutathione peroxidases), and its deficiency or dysregulation has been implicated in prostate tumorigenesis (Jiang et al., 2023; Tshoni et al., 2024). Therefore, a high toxic metal burden may not only exert direct damage, but also deplete protective elements from tissues, resulting in an additive elevation of risk.

From Initiation to Progression and Treatment Response. These pathways oxidative stress, DNA damage, hormonal disruption, inflammation and essential metal imbalance function along the tumor initiation, but also along its progression. For example, the patterns of trace elements may affect tumor aggressiveness (Gleason score), metastatic potential, or response to treatment (e.g. radiotherapy, androgen-deprivation therapy) by modifying tumor microenvironmental, DNA repair capacity, or antioxidant capacity (Neslund-Dudas et al., 2018; Tshoni et al., 2024). So, a detailed exposure mapping, in combination with biomarkers and clinical or pathologic data (e.g. stage, Gleason grade, PSA kinetics), may provide an opportunity to identify high-

risk individuals, prognostic biomarkers, or novel intervention avenues (Lim et al., 2019).

CURRENT EPIDEMIOLOGIC EVIDENCE LINKING TRACE ELEMENTS AND PROSTATE CANCER

There have been breakthroughs in trace elements epidemiology that focus on the epidemiological elemental factors of prostate carcinogenesis, though establishing causality is still difficult. Cd is cited as one of the most studied environmental carcinogens (IARC, 2012). Multiple meta-analyses and population-based studies pointed out the relationship of Cd to the increase in risk of PCa due to its pro-oxidant and endocrine-disrupting characteristics. Firmani et al., (2024) updated meta-analyses that showed chronic exposure to Cd is correlated to increases in risk of developing PCa, although there is still some heterogeneity in the exposure assessments. Mohammadian-Hafshejani and colleagues (2024) provide further evidence to support the relationship between Cd and PCa. With increasing levels of Cd exposure, the risk of developing PCa is also increasing, which adds to the biological support of the potential for Cd to cause prostate cancer. At the population level, Bede-Ojimadu et al. (2023) observed that among Nigerian men, urinary Cd was strongly associated with PCa incidence, particularly in individuals with low Zn status, suggesting a toxic-nutrient interaction antagonism between Cd and Zn.

There are still mechanistic and epidemiologic ties with As exposure due to it being the carcinogenic agent as well (IARC, 2012). Dennis et al. (2024) describes toenail concentrations of inorganic As were positively associated with PCa among pesticide applicators, which reinforces the idea of long-term As exposure as a potential driver of prostate carcinogenesis. In a recent study, Tyagi et al. (2023) showed how serum As and Cd levels were higher in PCa patients than in the controls, validating the association between toxic metal burden and the advancing stage of the disease.

On the other hand, the association of the other essential elements, particularly Se and Zn are complex and contextual. Quoting multiple experimental and clinical studies, Jiang et al. (2023) showed that Se, via its Selenoprotein constituent, possesses potent antioxidant and anti-inflammatory properties that may avert the onset of a tumor. Still, in a meta-analysis, Devi et al. (2025) noted epidemiological findings were contradictory. For instance, serum Se levels that were extremely low, and conversely, very

high were associated with PCa. Zn plays a major role in the prostate and is the predominant constituent of the normal prostatic epithelium, and in citrate metabolism and apoptosis (Karunasinghe, 2022). However, epidemiological and clinical studies on the relationship between Zn status and PCa still show inconsistent results. Shahrokhi et al. (2024) reported that while malignant prostate tissue lacked Zn, circulating Zn levels inconsistent predictors of risk, likely due to disease-related redistribution rather than an absence of Zn in the diet.

Recent multi-elemental study by Zhan et al. (2025) profiled 19 elements among PCa patients in Southwest China and found complex, integrated patterns of dysregulation involving Cd, Cu, Fe, and Se, underscoring the importance of modeling mixtures. Similarly, Tshoni et al. (2024) found that oxidative stress, inhibition of DNA repair, and hormonal disruption, all of which are mediated by metals, integrated together in PCa pathogenesis. Overall, the multiple studies demonstrate the element-specific heterogeneity, dynamics in co-exposure, and context with respect to host nutrition or genetics are what likely account for the relationships observed involving trace elements calling for improved multi-element exposure assessment, biomarker validation, and integrative approaches to epidemiological research, in order to disentangle the contributions of trace elements to the etiology of PCa.

REGIONAL CONTEXT

The different environmental, industrial, and dietary contexts of Russia and other countries provide a reason to compare the roles of trace elements in the pathogenesis of PCa in different countries. Although different regions face environmental metal contamination, the sources, intensity, and population exposures differ greatly, giving the regions a unique opportunity to explore the consequences of trace elements and their interactions on the prostate.

Russia shows a unique distribution of metals particularly in proximity to industrial and mining regions (Skalny et al., 2015). Evidence has shown elevated accumulation of toxic metals and great concern with mining and metallurgical regions impacting local people (Kirichuk et al., 2023; Grabeklis et al., 2020). Russian biomonitoring studies showing exposures to Cd, Pb, and mercury (Hg) across space, related to regional contamination from industrial emissions and legacies from prior pollution (Skalny et al., 2023). This is advanced use of keratin-based biomarker and aligns with exposomic approaches

that are needed in Europe (Shilnikova et al., 2023). Furthermore, Russian studies has commenced looking into the use of multi-elemental and mechanistic strategies to study the combined effects of metals Signatures on a broader scale. This will improve our overall understanding of how to link actual metal exposures to the development of PCa risk. (Grabeklis et al., 2020; Tshoni et al., 2024).

Studies focus on the East Asia indicate the incidence of prostate cancer is increasing and suggests that the combined exposure of trace and heavy metals may be the main contributing factor (Pang et al., 2023; Jiang et al., 2025). A case-control study from Zhan and fellow conducted in Southwest China which used ICP-MS to quantify 19 serum elements, found that prostate cancer correlated with lower copper, zinc, and selenium levels as well as altered inter-element correlations, which further demonstrates the importance of multi-element panels for targeted biomonitoring (Zhan et al., 2025). Both increasing evidence of population studies and mechanistic studies of PCa are showing that exposure to a combination of heavy metals can affect certain pathways and cancer-related genes. Through an epidemiological study, metal-responsive cancer driver genes have been found (Song et al., 2025; Jiang et al., 2023). These studies underscore the need for combined exposure analysis and transcriptomic studies in certain areas. PCa is increasingly prevalent in China, and is further complicated with complicated region-specific patterns of certain multi-element combinations in serum and tissue that probably reflect industrial activities, mining, metallurgy, coal burning, and selenium in diet.

While in South Asia, Pakistan's unregulated industrialization, unregulated effluent discharges, and over-usage of agro-chemicals have raised soil and water contamination levels with Cd, Pb, As, and chromium (Cr). The shallow aquifers of Punjab and Sindh regions have been documented with As, which can have long-term carcinogenic consequences (Shahid et al., 2023). Aziz et al. (2023) documented Cr bioaccumulation in the aquatic fauna of Central Punjab and highlighted the risk of chronic exposures to humans. Hussain et al. (2023) conducted a cross sectional study and reported biomarker levels of Cd, Pb, and Ni in the hair and blood of men, particularly industrial and agricultural workers from Southern Punjab, confirming ongoing environmental exposure. Qayyum et al. (2025) also built on this work by looking into serum levels of 20 metals in male patients with prostate diseases and

showed significant associations of elevated Cd, Ni, and Pb levels with prostate gland pathology, while Zn and Se appeared to offer protection. The imbalance of toxic-essential metals represents a mechanistic area of focus. Research by Chanihoon et al. (2022) from Pakistan showed that Zn deficiency and Cd exposure increased oxidative damage and DNA instability in breast cancer, a mechanism that can be expected for PCa as well.

Studies show that prostate cancer in the Middle East and Gulf region is often diagnosed at an advanced stage, with many men presenting with metastatic, high-PSA disease and rapid progression from castration-sensitive to castration-resistant states. A multicenter retrospective study comprised of 615 men over 4 countries was published by El-Karak and co-workers. Slightly more than half of them had metastatic disease. Metastatic castration sensitive diseases had higher mean PSAs than the localized disease and the time intervals between mCSPC and Castration Resistance and between mCRPC and the next line of therapy were short (El-Karak et al., 2024). Alasker and co-authors in Saudi Arabia Analytic Description of the National Registry reported more frequent elevated PSAs and advanced disease stage at the time of diagnosis and marked regional variation in the incidence and mortality statistics which probably correlate to the variation in the ecosystem, diet, occupation, and access to healthcare (Alasker et al., 2023).

Supporting the clinic and the registry, Kearney et al. had analyzed the data from the Global Cancer Observatory and reported from several countries in the world which do not belong to the Gulf region that the age standardized incidence and mortality rates were significantly variable and that the ratio of the mortality to incidence was high suggesting that the diseases in such countries were quite aggressive and the disease is at an advanced stage at the time of diagnosis (Kearney et al., 2023). The studies show how most patients in the region are diagnosed late, suffer high PSA, and have varying signs and symptoms, which is the situation in the Middle East and Gulf region and will aid in understanding the epidemiology of how essential and toxic trace elements may relate to the risk and progression of prostate cancer in conjunction with genetics, lifestyle and healthcare system factors in the future.

Comparatively different countries have common exposures, though their contexts are different. In Pakistan, the problems mainly relate to As in groundwater and Cd in foods, while in Russia, the problems mainly relate to industrial wastes and met-

allurgical wastes. In addition, dietary factors also modify metal intake; for example, while some parts of Russia consume a lot of Se from the seafood, the diet in Pakistan is almost entirely based on cereals, which have lower Se concentrations. Together, these regions illustrate how the risk PCa and its progression are influenced by differing metal mixtures, deficiencies, and exposures. While China reports dysregulations across multiple elements due to industrial emissions and variable selenium in the diet. The Gulf States show high incidence and mostly late-stage disease which suggests the role of uninvestigated environmental metals, diet, and disease in advancing clinical stages of the disease.

Prostate cancer patterns across Russia, China, Gulf States, and Pakistan demonstrate the importance of differentiated environmental and industrial metal exposures shaping bio-elements disease relationships. Tyagi et al. (2023) argued that environmental and dietary contexts can alter the internal dose of trace elements and their influence on the disease phenotype. These findings are supported by global studies highlighting the extent that Zn–Cd antagonism is important to PCa biology (Bede-Ojimadu et al., 2023; Firmani et al., 2024). The protective effect of Se is dependent not only on antioxidant selenoprotein, but by the local soil and dietary patterns; the Se deficiencies common in South Asia may impair redox homeostasis (Jiang et al., 2023; Petukhov et al., 2018).

PUBLIC HEALTH AND CLINICAL RELEVANCE

The implications of recent findings on trace elements and the development of PCa are significant for the risk of public health, preventive oncology, and clinical management. Studies show that imbalances (deficiency and excess) of certain trace elements may alter the risk, aggressiveness, and response of the disease to treatment (Devi et al., 2025; Tyagi et al., 2023; Tshoni et al., 2024). There are specific elemental signatures including elevated levels of Cd and Pb and lower levels of Zn and Se, which are strongly correlated with PCa. Findings of this nature call for translation across the environmental, nutritional, and clinical spectra.

The metal-induced carcinogenesis perspective justifies the tightening of rules concerning industrial emission controls, the composition of agrochemicals, and the management of mining waste. The need for such action is illustrated with evidence from multiple countries. Hussain et al. (2023) showed that southern Punjab, in Pakistan, had a male population

with highly elevated Cd, Pb, and As levels, whereas in Russia (Skalny et al., 2015), Kirichuk et al. (2023) documented similar multi-element exposures in mining-affected regions. Such findings are similar to those from Nigeria, where there is an association between Cd exposure and increased risk of PCa, especially in the context of Zn deficiency (Bede-Ojimadu et al., 2023). These findings underscore the need for metal burden-inspired disease etiology research to guide localized, exposure-focused mitigation policies (Laoye et al., 2025; Shahid et al., 2023).

From a clinical standpoint, trace elements like Zn and Se represent possible biomarkers and modulators of prostate tumor biology. Part of Selenium's antioxidant role is performed by selenoprotein, which may prevent oxidative DNA damaging, and progression of Se-related metabolites PCa has been documented (Jiang et al., 2023). Additionally, Zn induces apoptotic processes, and its depletion prevents citrate metabolism in prostate tissue facilitating its transformation (Karunasinghe, 2022; Shahrokhi Nejad et al., 2024). Multiple-element analysis, like those performed by Zhan et al. (2025) and Qayyum et al. (2025), demonstrated that co-exposures, rather than deviation from single-elements, are better predictors of PCa incidence and severity. This advocates the construction of exposure derived risk models incorporating nutritional and toxicological elements (Firmani et al., 2024; Coradduzza et al., 2025).

Non-invasive biomonitoring tools like hair and nail analysis for elemental composition provide new means for surveillance of exposure and screening at the population level. Implemented laser ablation and new spectroscopic methods provide accurate multi-element assessments (Chan et al., 2023; Skalny et al., 2023; Silva et al., 2025;). These methods are most advantageous in under-resourced areas of the world lacking environmental monitoring (Tehrani et al., 2020; Batyrova et al., 2025). The designed epidemiologic studies and early detection programs would benefit from these methods by enabling longitudinal studies of the exposure–response relationships in populations.

Incorporating dietary suggestions focused on essential micronutrient consumption rates and quotient levels to combat the oxidative and inflammatory effects of toxic metals is necessary for public health responses (Saleh et al., 2020; Pizent et al., 2022). Mechanistic insight from Hussain et al. (2024) demonstrates how pollution-induced changes in the bioavailability of certain trace elements lead to oxidative stress and systemic inflammation, both of which are closely associated with the development of PCa. In addition to prevention, exposure-linked metabolic and genomic biomarkers may position malignancy chemopreventive and therapeutic strategies to target PCa redox and metal-regulated pathways (Tshoni et al., 2024).

REFERENCES

- Alasker A., Arabi T.Z., Alghafees M.A., Sabbah B.N., Abdul Rab S., Alageel A.K., Abouelkhair A.E., Abdulwali A.K., Al Hennawi M.M.I., Fallatah W., Musalli Z.F., Nouredin Y.A. Prostate cancer among Saudis: a registry review. *Ann Med Surg (Lond)*. 2023 Nov 7; 86(1): 56–61. DOI: 10.1097/MS9.0000000000001448. PMID: 38222704; PMCID: PMC10783378.
- Aziz S., Altaf J., Khalil A., Khalil H., Jehangir K., Awan F.S. Human cancer risk due to chromium and its bioaccumulation in physids in Central Punjab, Pakistan. *EnvFe Sci Pollut Res Int*. 2023 Jun; 30(29): 74223–74235. DOI: 10.1007/s11356-023-27664-0. PMID: 37204568.
- Batyrova G., Umarova G., Umarov Y., Taskozhina G., Kononets V., Batyrov R. Association Between Hair Trace Element Content and Children's Growth and Development: Protocol for a Cross-Sectional Surveillance Study. *JMIR Res Protoc*. 2025 Sep 16; 14: e72207. DOI: 10.2196/72207. PMID: 40957019; PMCID: PMC12485260.
- Bede-Ojimadu O., Nnamah N., Onuegbu J., Grant-Weaver I., Barraza F., Orakwe J., Abiahu J., Orisakwe O.E, Nriagu J. Cd exposure and the risk of prostate cancer among Nigerian men: Effect modification by Zn status. *J Trace Elem Med Biol*. 2023 Jul; 78: 127168. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127168. PMID: 37043921.
- Bergengren O., Pekala K.R., Matsoukas K., Fainberg J., Mungovan S.F., Bratt O., Bray F., Brawley O., Luckenbaugh A.N, Mucci L., Morgan T.M., Carlsson S.V. 2022 Update on Prostate Cancer Epidemiology and Risk Factors-A Systematic Review. *Eur Urol*. 2023 Aug; 84(2):191–206. DOI: 10.1016/j.eururo.2023.04.021. PMID: 37202314; PMCID: PMC10851915.
- Chan Y.N., Lum J.T., Leung K.S. Development of a comprehensive method for hair and nail analysis using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Microchemical Journal*. 2023 May 1; 188: 108503; <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108503>.
- Chanihoon G.Q., Afridi H.I., Talpur F.N., Kazi T.G., Baig J.A. Interaction Between Essential (Zn) and Toxic (Cd) Elements in Different Stages of Female Breast Cancer Patients, Resident in Different Cities of Sindh, Pakistan. *Biol Trace Elem Res*. 2022 Mar; 200(3): 1117–1126. DOI: 10.1007/s12011-021-02757-4. PMID: 34057654.
- Coradduzza D., Sanna A., Di Lorenzo B., Congiargiu A., Marra S., Cossu M., Tedde A., De Miglio M.R., Zinellu A., Mangoni A.A., Cogoni A.A., Madonia M., Carru C., Medici S. Associations between plasma and urinary heavy metal concentrations and the

risk of prostate cancer. *Sci Rep.* 2025 Apr 24; 15(1): 14274. DOI: 10.1038/s41598-025-97682-0. PMID: 40274938; PMCID: PMC12022027.

Crocetto F., Barone B., D'Aguanno G., Falcone A., de Vivo R., Rienzo M., Recchia L., Di Zazzo E. Vitamin D, a Regulator of Androgen Levels, Is Not Correlated to PSA Serum Levels in a Cohort of the Middle Italy Region Participating to a Prostate Cancer Screening Campaign. *J Clin Med.* 2023 Feb 24; 12(5): 1831. DOI: 10.3390/jcm12051831. PMID: 36902619; PMCID: PMC10003229.

Dennis L.K., Langston M.E., Beane Freeman L., Canales R.A., Lynch C.F. Trace Element Concentrations of As and Se in Toenails and Risk of Prostate Cancer among Pesticide Applicators. *Curr Oncol.* 2024 Sep 14; 31(9): 5472–5483. DOI: 10.3390/curroncol31090405. PMID: 39330033; PMCID: PMC11430890.

Devi V., Chaudhary V., Sharma M., Kumari S., Pal B. Serum levels of trace elements in patients with prostate cancer: a systematic review and meta-analysis. *Cancer Causes Control.* 2025 Jul 21. DOI: 10.1007/s10552-025-02041-z. PMID: 40691674.

El-Karak F., Shamseddine A., Omar A., Haddad I., Abdelgawad M., Naqqash M.A., Kaddour M.A., Sharaf M., Abdo E. Prostate cancer across four countries in the Middle East: a multi-centre, observational, retrospective and prognostic study. *Ecancermedicinescience.* 2024 Apr 16; 18: 1695. DOI: 10.3332/ecancer.2024.1695. PMID: 38774566; PMCID: PMC11108050.

Firmani G., Chiavarini M., Dolcini J., Quarta S., D'Errico M.M., Barbadoro P. The Association Between Cd Exposure and Prostate Cancer: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J EnvFe Res Public Health.* 2024 Nov 19; 21(11): 1532. DOI: 10.3390/ijerph21111532. PMID: 39595799; PMCID: PMC11593822.

Górska A., Markiewicz-Gospodarek A., Trubalski M., Żerebiec M., Poleszak J., Markiewicz R. Assessment of the Impact of Trace Essential Metals on Cancer Development. *Int J Mol Sci.* 2024 Jun 21; 25(13): 6842. DOI: 10.3390/ijms25136842. PMID: 38999951; PMCID: PMC11241304.

Grabeklis A.R., Skalny A.V., Ajsuvakova O.P., Skalnaya A.A., Mazaletskaya A.L., Klochkova S.V., Chang S.J.S., Nikitjuk D.B., Skalnaya M.G., Tinkov A.A. A Search for Similar Patterns in Hair Trace Element and Mineral Content in Children with Down's Syndrome, Obesity, and Growth Delay. *Biol Trace Elem Res.* 2020 Aug; 196(2): 607–617. DOI: 10.1007/s12011-019-01938-6. PMID: 31713112.

Hussain M.B., Lapin I.I., Elh Yaou Moussa H., Korobeinikova T.V. Comparative analysis of data on the content of chemical elements in the hair and nails of patients with pca and bph in different countries of the world. *Trace elemets in medicine.* 2025; 26(2): 3–13. DOI: 10.19112/2413-6174-2025-26-2-3-19.

Hussain M.B., Ghaleb S.H., Mahjabeen M.R., Rashid S., Durrani S., Rasheed N., Munir A. Evaluating the impact of smog-induced pollution on trace element concentrations in blood. *Afr. J. Bio. Sc.* 2024; 6(16): 1511–528. DOI: 10.48047/AFJBS.6.16.2024.1511-1528.

Hussain S., Khanam T., Ullah S., Aziz F., Sattar A., Hussain, Saddique M.A.B., Maqsood A., Ding C., Wang X., Yang J. Assessment and Exposure Analysis of Trace Metals in Different Age Groups of the Male Population in Southern Punjab, Pakistan. *Toxics.* 2023 Nov 24; 11(12): 958. DOI: 10.3390/toxics11120958. PMID: 38133359; PMCID: PMC10747213.

Jiang J., Chen B., Tang B., Wei Q. Se in Prostate Cancer: Prevention, Progression, and Treatment. *Pharmaceuticals (Basel).* 2023 Sep 5; 16(9): 1250. DOI: 10.3390/ph16091250. PMID: 37765058; PMCID: PMC10536940.

Kanwal R., Pandey M., Bhaskaran N., MacLennan G.T., Fu P., Ponsky L.E., Gupta S. Protection against oxidative DNA damage and stress in human prostate by glutathione S-transferase P1. *Mol Carcinog.* 2014 Jan; 53(1): 8–18. DOI: 10.1002/mc.21939. PMID: 22833520; PMCID: PMC4018746.

Karunasinghe N. Zn in Prostate Health and Disease: A Mini Review. *Biomedicines.* 2022 Dec 10; 10(12): 3206. DOI: 10.3390/biomedicines10123206. PMID: 36551962; PMCID: PMC9775643.

Kearney G., Chen M.H., Mula-Hussain L., Skelton M., Eren M.F., Orio P.F., Nguyen P.L., D'Amico A.V., Sayan M. Burden of prostate cancer in the Middle East: A comparative analysis based on global cancer observatory data. *Cancer Med.* 2023 Dec; 12(23): 21419–21425. DOI: 10.1002/cam4.6689. PMID: 37930194; PMCID: PMC10726787.

Kirichuk A.A., Skalny A.V., Chizhov A.Y., Tskhovrebov A.G., Schaumlöffel D., Kritchenkov A.S. Characteristic features of toxic metal content in hair samples of foreign students at RUDN University from different geographic regions. *J Trace Elem Med Biol.* 2023 Dec; 80: 127303. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127303. PMID: 37741050.

Laoye B., Olagbemide P., Ogunnusi T., Akpor O. Heavy Metal Contamination: Sources, Health Impacts, and Sustainable Mitigation Strategies with Insights from Nigerian Case Studies. *F1000Res.* 2025 Jul 11; 14:134. DOI: 10.12688/f1000research.160148.4. PMID: 40822873; PMCID: PMC12355173.

Lim J.T., Tan Y.Q., Valeri L., Lee J., Geok P.P., Chia S.E., Ong C.N., Seow W.J. Association between serum heavy metals and prostate cancer risk - A multiple metal analysis. *Environ Int.* 2019 Nov; 132: 105109. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105109. Epub 2019 Sep 3. PMID: 31491608.

IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Arsenic, Metals, Fibres and Dusts.* Lyon, France: International Agency for Research on Cancer; 2012. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol 100C.

Mohammadian-Hafshejani A., Farahmandian P., Fadaei A., Sadeghi R. Investigating the Relationship between Cd Exposure and the Risk of Prostate Cancer: A Systematic Review and Dose-Response Meta-Analysis. *Iran J Public Health.* 2024 Mar; 53(3): 553–567. DOI: 10.18502/ijph.v53i3.15136. PMID: 38919294; PMCID: PMC11194657.

Neslund-Dudas C.M., McBride R.B., Kandegedara A., Rybicki B.A., Kryvenko O.N., Chitale D., Gupta N., Williamson S.R., Rogers C.G., Cordon-Cardo C., Rundle A.G., Levin A.M., Dou Q.P., Mitra B. Association between cadmium and androgen receptor protein expression differs in prostate tumors of African American and European American men. *J Trace Elem Med Biol.* 2018 Jul; 48: 233–238. DOI: 10.1016/j.jtemb.2018.04.006. PMID: 29773186; PMCID: PMC5985809.

Pang Y., Li J., Hu H., Ung C.O.L. Genetic associations of prostate cancer in China: a systematic review. *BMC Cancer.* 2025 Apr 3; 25(1): 604. DOI: 10.1186/s12885-025-13830-9. PMID: 40181298; PMCID: PMC11966891.

Petukhov V.I., Dmitriev E.V., Baumane L.K., Skalny A.V., Lobanova Y.N., Grabeklis A.R. Some aspects of regulatory criteria for metal-ligand homeostasis in epidermal cells. *Journal of Antioxidant Activity.* 2018 Jan 24; 1(3): 22–32. DOI: 10.14302/issn.2471-2140.jaa-17-1927.

Pizent A, Anđelković M., Tariba Lovaković B., Živković Semren T., Buha Djordjevic A., Gamulin M., Bonderović V., Aćimović M., Bulat Z. Environmental Exposure to Metals, Parameters of Oxidative Stress in Blood and Prostate Cancer: Results from Two Cohorts. *Antioxidants (Basel).* 2022 Oct 18; 11(10): 2044. DOI: 10.3390/antiox11102044. PMID: 36290767; PMCID: PMC9598453.

Qayyum M.A., Mahmood M.H.R., Farooq T., Irfan A., Iqbal S., Hussain N. Multivariate Statistical Evaluation of 20 Metals/Metalloid Levels in the Serum of Patients with Prostate Gland Diseases. *Indian J Clin Biochem.* 2025 Jul; 40(3): 392–411. DOI: 10.1007/s12291-024-01209-9. PMID: 40625609; PMCID: PMC12229380.

Rawla P. Epidemiology of Prostate Cancer. *World J Oncol.* 2019 Apr; 10(2): 63-89. DOI: 10.14740/wjon1191. PMID: 31068988; PMCID: PMC6497009.

Saleh S.A.K., Adly H.M., Abdelkhalik A.A., Nassir A.M. Serum Levels of Se, Zn, Cu, Manganese, and Fe in Prostate Cancer Patients. *Curr Urol.* 2020 Mar; 14(1): 44–49. DOI: 10.1159/000499261. PMID: 32398996; PMCID: PMC7206590.

Shahid S.U., Abbasi N.A., Tahir A., Ahmad S. Ahmad S.R. Health risk assessment and geospatial analysis of As contamination in shallow aquifer along Ravi River, Lahore, Pakistan. *EnvFe Sci Pollut Res Int.* 2023 Jan; 30(2): 4866–4880. DOI: 10.1007/s11356-022-22458-2. PMID: 35976585.

Shahrokhi Nejad S., Golzari Z., Zangiabadian M., Salehi Amniyeh Khozani A.A., Ebrahimi R., Nejadghaderi S.A., Aletaha A. The association between Zn and prostate cancer development: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One.* 2024 Mar 20; 19(3): e0299398. DOI: 10.1371/journal.pone.0299398. PMID: 38507438; PMCID: PMC10954196.

Shilnikova N., Momoli F., Karyakina N., Krewski D. Review of non-invasive biomarkers as a tool for exposure characterization in human health risk assessments. *J Toxicol EnvFe Health B Crit Rev.* 2025 Feb 17; 28(2): 122–150. DOI: 10.1080/10937404.2024.2428206. Epub 2024 Nov 28. PMID: 39607011.

Silva J., Margui E., Guillemaut R., Jablan J., Migliori A., Kasprzyk P., Ferreira J.J., Pessanha S. Evaluation of the quantitative performance of different spectroscopic techniques for multielemental analysis of nail and hair samples: A comparative study. *J Trace Elem Med Biol.* 2025 Sep 16; 92: 127751. DOI: 10.1016/j.jtemb.2025.127751. PMID: 40976144.

Skalny A.V., Korobeinikova T.V., Aschner M., Baranova O.V., Barbounis E.G., Tsatsakis A., Tinkov A.A. Medical application of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for assessment of trace element and mineral in biosamples: Laboratory and clinical validity of the method. *J Trace Elem Med Biol.* 2023 Sep; 79: 127241. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127241. PMID: 37393771.

Song W., Zhang T., Ou J., Ni J., Tang J., Zhang H., Zhang H., Wang G., Chang J., Peng B., Wang K. Environmental exposure to heavy metals and their potential impact on prostate cancer prognosis-related gene expression. *Food Chem Toxicol.* 2025 Oct; 204: 115641. DOI: 10.1016/j.fct.2025.115641. PMID: 40683381.

Tehrani M.W., Yang K.X., Parsons P.J. Development and characterization of reference materials for trace element analysis of keratinized matrices. *Anal Bioanal Chem.* 2020 Mar; 412(8): 1847–1861. Doi: 10.1007/s00216-020-02432-y. PMID: 32020317; PMCID: PMC7197407.

Tsakalof A., Sysoev A.A., Vyatkina K.V., Eganov A.A., Eroshchenko N.N., Kiryushin A.N., Adamov A.Y., Danilova E.Y., Nosyrev A.E. Current Role and Potential of Triple Quadrupole Mass Spectrometry in Biomedical Research and Clinical Applications. *Molecules.* 2024 Dec 9; 29(23): 5808. DOI: 10.3390/molecules29235808. PMID: 39683965; PMCID: PMC11643727.

Tshoni U.A., Mbonane T.P., Rathebe P.C. The Role of Trace Metals in the Development and Progression of Prostate Cancer. *Int J Mol Sci.* 2024 Oct 5; 25(19): 10725. DOI: 10.3390/ijms251910725. PMID: 39409053; PMCID: PMC11476615.

Skalny A.V., Skal'naya M.G., Tinkov A.A., et al. Hair concentration of essential trace elements in adult non-exposed Russian population. *Environmental monitoring and assessment*, 2015; 187(11): 677.

Tyagi B., Chandrasekaran B., Tyagi A., Shukla V., Saran U., Tyagi N., Talluri S., Juneau A.D., Fu H., Ankem M.K., Damodaran C. Exposure of environmental trace elements in prostate cancer patients: A multiple metal analysis. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2023 Nov 15; 479:116728. DOI: 10.1016/j.taap.2023.116728. PMID: 37858873.

Zhan M., Chuai Y., Zhou X., Li J., Zhou X., Zhang Z., Jin Y., Huang W., Huang X., He S., Zeng H., Qiu S., Zou X. A Case-Control Study of Association Between Serum Levels of 19 Trace Elements with Prostate Cancer in Southwest China. *Biol Trace Elem Res.* 2025 Oct; 203(10): 5081–5095. DOI: 10.1007/s12011-025-04563-8. PMID: 40091096.

Zhou C.H., Wang H.L., Yu C.H., Li G.H. Mendelian Randomization Analyses Explore the Relationship between Trace Elements and Prostate Cancer. *Clin Lab.* 2025 May 1;71(5). doi: 10.7754/Clin.Lab.2024.241010. PMID: 40387752.

Information about the authors:

Muhammad Bakir Hussain – Post-graduate Student, Centre for Bioelementology and Human Ecology
ORCID: 0009-0007-5425-9180

Kamran Zaidi – Associate Professor, Department of Urology
ORCID: 0009-0006-9168-5210

Илья I. Лапин – Laboratory Assistant, Laboratory of Molecular Dietetics,
Centre for Bioelementology and Human Ecology¹;
Assistant of Department of Medical Elementology³
ORCID: 0009-0005-5176-9770; SPIN: 5281-1047

Dmitry M. Lyapunovsky – Apprentice-Researcher
at the Laboratory of Medical Elementology and Human Ecology
of the Research Institute of Molecular and Cellular Medicine of Medical Institute,
Post-Graduate Student of Department of Medical Elementology of Medical Institute
ORCID: 0009-0003-4863-1792; SPIN: 3634-8816

Anatoly V. Skalny – Dr.Sc. (Med.), Professor,
Head of the Department of Medical Elementology of Medical Institute³;
Director of the Center for Bioelementology and Human Ecology¹
E-mail: skalnyy-aa@rudn.ru; ORCID: 0000-0001-5310-3853; SPIN: 9069-0962

Evgeny A. Bezrukov – Dr.Sc. (Med.), Vice-Principal for Innovation and Clinical Activities;
Professor at the Institute of Urology and Human Reproductive Health
SPIN: 2208-2676

Vladimir I. Torshin – Dr.Sc. (Biol.), Professor,
Head of the Normal Physiology Department of Medical Institute
ORCID: 0000-0002-3950-8296; SPIN: 8602-3159

Alexander E. Severin – Dr.Sc. (Med.),
Professor of the Normal Physiology Department of Medical Institute
SPIN: 7297-4092

Conflict of interest

The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

РОЛЬ ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ И ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАЗВИТИИ РАКА ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ. СООБЩЕНИЕ 1. БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

**М.Б. Хуссейн¹, К. Заиди², И.И. Лапин^{1,3*}, Д.М. Ляпуновский³, А.В. Скальный^{1,3},
Е.А. Безруков¹, В.И. Торшин³, А.Е. Северин³**

¹ ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова»;
Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Трубецкая д. 8, стр. 2

² Лахорская больница общего профиля;
Исламская Республика Пакистан, 540000, Лахор

³ ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»;
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

* **Лапин Илья Игоревич** – E-mail: lapin_i_i@staff.sechenov.ru

РЕЗЮМЕ. Рак предстательной железы (РПЖ) остается одним из ведущих неинфекционных заболеваний в мире, его развитие все чаще связывают с комбинированным воздействием эссенциальных (жизненно важных) и токсичных элементов. В данной статье рассматриваются текущие эпидемиологические данные, механизмы и аналитические показатели, касающиеся роли цинка (Zn), селена (Se), меди (Cu), кадмия (Cd), мышьяка (As), свинца (Pb) и многих других микроэлементов в патологии РПЖ. Эссенциальные элементы, такие как Zn и Se, способствуют работе антиоксидантных систем защиты, восстановлению ДНК, апоптозу и метаболизму цитрата. В то же время токсичные металлы (Cd, As, Pb) и избыток меди усиливают окислительный стресс, эндокринные нарушения, геномную нестабильность и воспалительные процессы, связанные с возникновением и прогресси-

рованием РПЖ. При разработке стратегий на основе анализа экспосомики подчеркивается важность многоэлементных взаимодействий, в частности антагонистических (например, Zn и Cd; Se и As).

Достижения в использовании метода ИСП-МС для неинвазивного биомониторинга волос и ногтей обеспечивают надежный способ определения долгосрочного воздействия нескольких микроэлементов в различных географических зонах. Продемонстрировано, что дисбаланс элементов, связанный с развитием и агрессивностью РПЖ, зависит от географического контекста. Полученные данные подтверждают необходимость интеграции профилей экологического воздействия с клеточными и молекулярными путями для совершенствования стратегий профилактики, разработки более точных биомаркеров заболевания и внедрения эффективных мер в области общественного здравоохранения. Необходимы новые подходы к диагностике, доступные для развивающихся стран технологии раннего выявления риска и предупреждения развития РПЖ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рак предстательной железы, микроэлементы, цинк, селен, кадмий, мышьяк, медь.

Для цитирования: Хуссейн М.Б., Заиди К., Лапин И.И., Ляпуновский Д.М., Скальный А.В., Безруков Е.А., Торшин В.И., Северин А.Е. Роль эссенциальных и токсичных элементов в развитии рака предстательной железы: комплексный анализ и перспективы. Сообщение 1. Биологические аспекты. Микроэлементы в медицине. 2026;27(1):13–23. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-13-23.

Информация об авторах:

Мухаммад Бакир Хуссейн – аспирант, Центр биоэлементологии и экологии человека
ORCID: 0009-0007-5425-9180

Камран Заиди – доцент кафедры урологии Лахорской больницы общего профиля
ORCID: 0009-0006-9168-5210

Илья Игоревич Лапин – лаборант лаборатории молекулярной диетологии, Центр биоэлементологии и экологии человека¹; ассистент кафедры медицинской элементологии, Медицинский институт³
E-mail: lapin_i_i@staff.sechenov.ru; ORCID: 0009-0005-5176-9770; SPIN: 5281-1047

Дмитрий Михайлович Ляпуновский – аспирант кафедры медицинской элементологии, стажер-исследователь лаборатории медицинской элементологии и экологии человека, НИИ Молекулярной и клеточной медицины, Медицинский институт
ORCID: 0009-0003-4863-1792; SPIN: 3634-8816

Анатолий Викторович Скальный – д.м.н., профессор, зав. кафедрой медицинской элементологии, Медицинский институт³, директор Центра биоэлементологии и экологии человека¹
E-mail: skalnyu-aa@rudn.ru; ORCID: 0000-0001-5310-3853; SPIN: 9069-0962

Евгений Алексеевич Безруков – д.м.н., проректор по инновационной и клинической деятельности, профессор Института урологии и репродуктивного здоровья человека
SPIN: 2208-2676

Владимир Иванович Торшин – д.б.н., профессор, зав. кафедрой нормальной физиологии, Медицинский институт
ORCID: 0000-0002-3950-8296; SPIN: 8602-3159

Александр Евгеньевич Северин – д.м.н., профессор кафедры нормальной физиологии, Медицинский институт
SPIN: 7297-4092

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила 12 ноября 2025 года
Принята к публикации 27 февраля 2026 года

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ТКАНЕЙ ЗУБА ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ

А.В. Камалян^{1*}, Е.Х. Баринов^{2,3,4}

¹ ООО «Научно-исследовательский центр судебной экспертизы и исследований» (ООО «НИЦ СЭИ»);
Российская Федерация, 123298, Москва, ул. Ирины Левченко, д. 1

² ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России;
Российская Федерация, 127006, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4

³ ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»;
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

⁴ ГБУЗ «Бюро судебно-медицинской экспертизы Департамента здравоохранения города Москвы»;
Российская Федерация, 115516, Москва, Тарный проезд, д. 3

РЕЗЮМЕ. Судебно-стоматологическая идентификация личности получила дальнейшее развитие в связи с внедрением высокоточных физико-химических методов исследования твёрдых тканей зуба, позволяющих выявлять устойчивые микроэлементные профили, отражающие геохимические особенности среды обитания, алиментарные факторы и длительные экзогенные воздействия, сохраняющиеся при выраженных посмертных изменениях и разрушении мягких тканей.

Цель исследования – проанализировать и систематизировать научные данные о судебно-медицинской значимости микроэлементного состава тканей зуба при идентификации личности с учётом аналитических методов элементного и изотопного анализа, интерпретации геохимических маркеров и различий национальных и зарубежных экспертных подходов.

Материалы и методы. Поиск публикаций выполнен в базах PubMed, Scopus и eLIBRARY за период 2000–2025 гг.; в обзор включены источники, посвящённые элементному анализу эмали, дентина и цемента корня зуба, применению масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, лазерной абляции, рентгенофлуоресцентного анализа и электронно-микроскопических методов в судебно-медицинской практике.

Результаты. Показано, что концентрации и пространственное распределение стронция, бария, свинца, цинка и меди формируют устойчивый комплекс химических признаков, пригодный для реконструкции географического происхождения и индивидуальных экологических воздействий. Отмечена высокая диагностическая ценность лазерно-абляционного масс-спектрометрического анализа и энергодисперсионной спектрометрии при локальном исследовании тканей зуба.

Заключение. Микроэлементный состав тканей зуба представляет самостоятельный класс идентификационных признаков в судебно-медицинской экспертизе, а интеграция геохимических методов анализа с традиционными судебно-стоматологическими исследованиями повышает воспроизводимость экспертных выводов и эффективность установления личности при отсутствии прижизненной медицинской документации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стоматология, микроэлементы, идентификация, эмаль, дентин.

Для цитирования: Камалян А.В., Баринов Е.Х. Судебно-медицинская значимость микроэлементного состава тканей зуба при идентификации личности. Микроэлементы в медицине. 2026;27(1):24–30. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-24-30.

ВВЕДЕНИЕ

Судебно-стоматологическая идентификация личности получила дальнейшее развитие в связи с внедрением высокоточных аналитических технологий исследования твёрдых тканей зуба, позволяющих выявлять устойчивые микроэлементные профили, отражающие длительное воздействие

факторов окружающей среды, алиментарные особенности и региональные геохимические условия проживания человека (Шмаров, 2020). Эмаль, дентин и цемент корня зуба отличаются высокой степенью минерализации и низкой скоростью постмортальных изменений химического состава, что обуславливает их диагностическую информа-

* Адрес для переписки:

Камалян Ашот Владимирович

E-mail: 9262465066@mail.ru

тивность при выраженной деструкции мягких тканей, скелетировании и воздействии экстремальных температур (Adserias-Garriga, 2019).

Микроэлементный состав зубных тканей формируется в процессе онтогенеза и частично модифицируется в течение жизни, аккумулируя элементы, поступающие с питьевой водой, пищевыми продуктами и аэрозольными загрязнителями, что создаёт индивидуализированные химические «подписи», потенциально пригодные для экспертного сопоставления с прижизненными биографическими и экологическими данными (Rodrigues et al, 2020). Концентрации стронция, бария, свинца, цинка, меди и ряда других элементов, а также особенности их пространственного распределения по слоям эмали и дентина рассматриваются как перспективные маркеры географического происхождения, миграционной истории и профессиональных воздействий (Figueiredo et al., 2021).

Современный арсенал судебно-медицинской экспертизы включает в себя методы масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, лазерно-абляционного элементного анализа, рентгенофлуоресцентной спектрометрии и электронно-микроскопических исследований, обеспечивающих локальную характеристику химического состава тканей зуба с высокой чувствительностью и воспроизводимостью (Лосев и др., 2025). Совмещение геохимических данных с морфологическими и радиологическими признаками зубочелюстного аппарата расширяет возможности индивидуализации биологических останков и повышает доказательственную значимость экспертных выводов при отсутствии полноценной стоматологической документации (Шефов и др., 2025).

В условиях роста числа случаев идентификации при массовых катастрофах, пожарах и криминальных событиях, сопровождающихся разрушением традиционных анатомических ориентиров, микроэлементный анализ тканей зуба рассматривается как перспективное направление судебной медицины, требующее дальнейшей методической стандартизации, сопоставимости аналитических протоколов и интеграции в комплексные идентификационные алгоритмы (Амоев и др., 2025).

Ц е л ь и с л е д о в а н и я – анализ и систематизация научных данных о судебно-медицинской значимости микроэлементного состава тканей зуба при идентификации личности с учётом аналитических возможностей элементного и изотопного анализа, интерпретации геохимических маркеров, устойчивости химических

профилей при посмертных воздействиях и различий национальных и зарубежных экспертных подходов к использованию данных показателей в идентификационных протоколах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск научных публикаций осуществлялся в электронных базах данных PubMed, Scopus и eLIBRARY с использованием терминологических сочетаний: «trace elements teeth forensic», «dental enamel elemental composition identification», «ICP-MS tooth analysis», «laser ablation dental tissues», «isotope analysis teeth forensic», «environmental exposure teeth», «cementum elemental profile forensic». В анализ включали статьи на русском и английском языках, посвящённые судебно-медицинскому применению микроэлементного и изотопного анализа эмали, дентина и цемента корня зуба, интерпретации геохимических сигналов, а также оценке устойчивости элементных профилей при воздействии высоких температур, длительном посмертном интервале и деградации мягких тканей (Рябухина, Полякова, 2018).

Критериями включения являлись полнотекстовая доступность источников, описание воспроизводимых методик количественного определения микроэлементов, наличие данных о пространственном распределении элементов в тканях зуба, обсуждение судебно-медицинской интерпретации результатов и возможности их использования для установления географического происхождения, миграционной истории и индивидуальных экологических воздействий (Khorwal et al., 2024). Исключались публикации, ограниченные клиническими аспектами минерализации зубов, стоматологической профилактики и терапией, а также исследования, не рассматривающие идентификационный потенциал элементного профиля (Emam, 2024).

На основании указанных критериев была сформирована совокупность источников, отражающая современное состояние методических подходов к использованию микроэлементного анализа тканей зуба в судебно-медицинской практике (Дегтярев и др., 2025).

В судебно-медицинских исследованиях элементный состав зубных тканей рассматривается как устойчивый биогеохимический маркер, сохраняющий диагностическую значимость при разрушении мягких тканей, скелетировании и термическом воздействии. Экспертное изучение базируется на комплексном применении методов

масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, лазерно-абляционного анализа с локальным отбором материала, рентгенофлуоресцентной спектрометрии и электронно-микроскопических методик с энергодисперсионной регистрацией элементного состава (Гажва и др., 2023).

Аналитический блок включает в себя количественное определение концентраций макро- и микроэлементов, оценку изотопных соотношений стронция, кислорода и свинца, а также картирование распределения элементов в слоях эмали и дентина с использованием микронзондовых и томографических подходов. Полученные данные подвергаются статистической нормализации, сравнительному анализу с региональными геохимическими фонами и сопоставлению с прижизненными экологическими и биографическими сведениями при их наличии (Мастерова и др., 2022).

В идентификационных протоколах микроэлементные профили тканей зуба рассматриваются в совокупности с традиционными судебно-стоматологическими признаками – морфологией коронок и корней, состоянием пломбировочных материалов, ортопедических конструкций и радиологическими характеристиками зубочелюстного аппарата, что обеспечивает повышение доказательственной силы экспертных выводов и снижение риска ошибочной атрибуции (Ойдинов и др., 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ включённых публикаций позволил выделить совокупность устойчивых диагностических параметров микроэлементного состава тканей зуба, обладающих наибольшей идентификационной значимостью в судебно-медицинской экспертизе. Наиболее информативными признаками признаны концентрации и пространственное распределение стронция, бария, свинца, цинка, меди и марганца, а также изотопные соотношения стронция и кислорода, отражающие региональные геохимические условия проживания и долговременные экологические воздействия (Nuzzolese, Pace, 2024). Показано, что эмаль фиксирует химический профиль преимущественно в детском возрасте, тогда как дентин и цемент корня способны аккумулировать элементы в более поздние периоды жизни, что расширяет возможности временной реконструкции миграционной истории индивида (Магсумова, 2022).

Результаты масс-спектрометрических исследований демонстрируют, что сочетание ла-

зерной абляции с индуктивно связанной плазмой обеспечивает высокую пространственную разрешающую способность при анализе микрослоёв эмали и дентина и минимальное разрушение объекта исследования (Карпова, Размахнина, 2024). Это позволяет выявлять послойные вариации элементного состава, сопоставимые с этапами минерализации зуба, и проводить сравнительный анализ между группами лиц, сформировавшихся в геохимически различных регионах. Рентгенофлуоресцентная спектрометрия и энергодисперсионный микроанализ в электронном микроскопе применяются для картирования распределения элементов по толщине ткани и выявления локальных зон накопления тяжёлых металлов, связанных с воздействием промышленных загрязнителей (Уварова и др., 2024).

В исследованиях, ориентированных на реконструкцию географического происхождения, установлена корреляция между изотопными соотношениями стронция в зубных тканях и геохимическими характеристиками питьевой воды и почв соответствующих территорий (Смердина и др., 2019). Использование региональных изотопных баз данных позволило с высокой вероятностью локализовать районы длительного проживания человека, особенно при анализе эмали постоянных моляров, минерализующихся в раннем детстве. Дополнительное включение кислородных изотопных показателей повышало дискриминационную способность метода за счёт отражения климатических условий и источников водоснабжения (Sethi et al., 2021).

Отдельный массив публикаций посвящён оценке сохранности микроэлементного профиля при воздействии высоких температур. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при термических нагрузках, характерных для пожаров и кремации, базовые элементные соотношения в апатитовой матрице эмали и дентина сохраняются в диагностически значимой степени, несмотря на структурные изменения кристаллической решётки (Андреева и др., 2018). При этом отмечено, что элементы с высокой летучестью могут демонстрировать частичное снижение концентраций, тогда как стронций и барий остаются относительно стабильными, что требует дифференцированного подхода к интерпретации результатов при исследовании обугленных останков (Янушевич и др., 2025).

Материаловедческие исследования показали, что поверхностные слои зубных тканей под-

вержены вторичному загрязнению продуктами горения и почвенными компонентами, тогда как внутренние зоны сохраняют прижизненный элементный профиль (Чижов и др., 2025). Применение микронзондовых методов отбора проб и послойного анализа позволяет разграничивать экзогенные наложения и эндогенные концентрации микроэлементов, что существенно снижает риск ошибочной атрибуции и повышает надёжность идентификационных выводов (Лавренюк, 2018).

Сравнительный анализ отечественных и зарубежных публикаций выявил различия в степени стандартизации аналитических протоколов и доступе к геохимическим референсным базам. В зарубежных исследованиях чаще используются централизованные изотопные карты и автоматизированные алгоритмы сопоставления, тогда как в национальной экспертной практике микроэлементные данные интерпретируются преимущественно в комплексе с морфологическими и радиологическими признаками зубочелюстного аппарата. В обеих моделях подчёркивается недопустимость использования элементного профиля в изоляции от иных идентификационных критериев и необходимость междисциплинарной верификации экспертных выводов (Вагнер и др., 2025).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённого анализа свидетельствуют о том, что микроэлементный состав тканей зуба формирует самостоятельный и высокоинформативный класс идентификационных признаков в судебно-медицинской экспертизе, осно-

ванный на совокупности воспроизводимых концентрационных и изотопных характеристик, пространственной организации элементов в эмали, дентине и цементе корня, а также их устойчивости к термическому воздействию и посмертным изменениям. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, лазерно-абляционного анализа, рентгенофлуоресцентной спектрометрии и электронно-микроскопических методов обеспечивает получение детализированных химических профилей, пригодных для реконструкции географического происхождения и экологической истории индивида при отсутствии полноценной прижизненной стоматологической документации.

Интеграция микроэлементных данных с традиционными судебно-стоматологическими критериями, включая морфологию зубов, радиологические характеристики зубочелюстного аппарата и сведения о стоматологических вмешательствах, повышает доказательственную значимость экспертных заключений и снижает риск ошибочной атрибуции. Выявленные различия между отечественными и зарубежными аналитическими подходами отражают уровень цифровизации геохимических баз данных и степень стандартизации лабораторных протоколов, что обосновывает необходимость унификации методических рекомендаций по отбору проб, аналитической обработке и судебно-медицинской интерпретации микроэлементного состава зубных тканей в национальном и транснациональном экспертном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

- Амоев Т.А., Волков А.Г., Дикопова Н.Ж., Гринин В.М., Панин А.М., Волков Н.А. Комплексное электросопротивление зубов и его роль при проведении электроодонтодиагностики. *Стоматология*. 2025; 104(2): 11–14. DOI: 10.17116/stomat202510402111. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/stomatologiya/2025/2/1003917352025021011>.
- Андреева С.Н., Гусаров А.А., Фетисов В.А. Анализ судебной практики по гражданским делам, связанным с дефектами оказания стоматологической помощи населению Российской Федерации за период с 1993 по 2017 г. *Судебно-медицинская экспертиза*. 2018; 61(3): 44–48. DOI: 10.17116/sudmed201861344-48. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/sudebno-meditsinskaya-ekspertiza/2018/3/1003945212018031044>.
- Вагнер В.Д., Смирнова Л.Е., Журина А.А. Законодательная основа и нормативное правовое регулирование ведения медицинской документации при оказании стоматологической помощи. *Стоматология*. 2025; 104(1): 71–75. DOI: 10.17116/stomat202510401171. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/stomatologiya/2025/1/1003917352025011071>.
- Гажва С.И., Манукян А.Г., Тетерин А.И., Янышева К.А., Якубова Е.Ю. Влияние различных способов одонтопрепарирования на структуру и микроэлементный состав эмали. *Клиническая стоматология*. 2023; 26(1): 24–31. DOI: 10.37988/1811-153X_2023_1_24. URL: <https://kstom.ru/ks/article/view/0105-04>.
- Дегтярев Н.Е., Мураев А.А., Казарян Г.Г., Мухаметшин Р.Ф., Иванов С.С. Цифровое планирование дентальной имплантации с применением аксиографии у пациента с нефиксированным прикусом. *Клиническая стоматология*. 2025; 28(1): 78–83. DOI: 10.37988/1811-153X_2025_1_78. URL: <https://kstom.ru/ks/article/view/0113-11>.
- Карпова Н.С., Размахнина Е.М. Клинический случай: удалить нельзя сохранить. Где поставить запятую? *Клиническая стоматология*. 2024; 27 (2): 166–171. DOI: 10.37988/1811-153X_2024_2_166. URL: <https://kstom.ru/ks/article/view/0110-24>.
- Лавренюк Е.А. Современные аспекты контроля качества и безопасности медицинской деятельности и экспертизы качества стоматологической помощи при болезнях пульпы и периапикальных тканей (обзор литературы). *Клиническая стоматология*. 2018; 4(88): 74–79. DOI: 10.37988/1811-153X_2018_4_74. URL: <https://kstom.ru/ks/article/view/0088-20>.

Лосев Ф.Ф., Чибисова М.А., Текучева С.В. Симпозиум: «Лучевая и функциональная диагностика в амбулаторной стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. От изображения до искусственного интеллекта». Стоматология. 2025; 104(5): 92–94. DOI: 10.17116/stomat202510405192. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/stomatologiya/2025/5/1003917352025051092>.

Магсумова О.А. Оценка изменений кислотоустойчивости и минерального состава эмали при химическом отбеливании зубов. Клиническая стоматология. 2022; 25(1): 13–19. DOI: 10.37988/1811-153X_2022_1_13.

Мастерова И.В., Ломиашвили Л.М., Погадаев Д.В., Габриелян И.К., Михайловский С.Г., Постолаки А.И. Совершенствование методов морфометрических исследований зубов. Клиническая стоматология. 2022; 25(1): 6–12. DOI: 10.37988/1811-153X_2022_1_6. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48156183>.

Ойдинов А.Э., Исламов Ш.Э., Бахриев И.И. Судебно-медицинская оценка повреждений зубов. Вопросы науки и образования. 2020; 30(114): 29–35. URL: scientificpublication.ru/images/PDF/2020/114/sudebno-meditsinskaya-ots.pdf.

Рябухина М.В., Полякова А.В. Обзор современных методов исследования ДНК человека, актуальных в экспертно-криминалистической деятельности. В: Деятельность правоохранительных органов в современных условиях: Сборник материалов XXVII международной научно-практической конференции; Иркутск; 03 июня 2022 года. Иркутск: Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации; 2022. С. 265–269; <https://elibrary.ru/item.asp?id=49512617&ysclid=mlf98m8alk498237626>.

Смердина Л.Н., Смердина Ю.Г., Мулин А.С., Сергеева Д.С. Необходимость восстановления окклюзионной поверхности моляров. Актуальные вопросы стоматологии. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019: 105–108. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37308768>. EDN: ZDDQVF.

Уварова А.Г., Гаспарян К.К., Аюпова Ф.С., Волобуев В.В., Мососова А.С., Ловлин В.Н. Диагностика и лечение одонтом у детей: обзор литературы и клинические случаи. Клиническая стоматология. 2024; 27(2): 16–21. DOI: 10.37988/1811-153X_2024_2_16. URL: <https://kstorm.ru/ks/article/view/0110-03>.

Чижов Ю.В., Хлуднева Н.В., Казанцева Т.В., Саргсян И.И. Демонстрация анализа дефектов оказания ортопедической стоматологической помощи по материалам комплексной судебно-медицинской экспертизы: клинический случай. Тихоокеанский медицинский журнал. 2025; 3: 83–88. DOI: 10.34215/1609-1175-2025-3-83-88. URL: <https://www.tmjvgtmu.ru/jour/article/view/2978>.

Шефов В.Ю., Орехова Л.Ю., Прохорова О.В. К вопросу о необходимости отдаливания матрицы при реставрациях проксимальных поверхностей зубов. Стоматология. 2025; 104(3): 16–20. DOI: 10.17116/stomat202510403116. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/stomatologiya/2025/3/1003917352025031016>.

Шмаров Л.А. Соотнесение результатов выполнения судебно-медицинских экспертиз с решениями судов по искам к медицинским организациям. Судебно-медицинская экспертиза. 2020; 63(3): 8–12. DOI: 10.17116/sudmed2020630318. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/sudebno-meditsinskaya-ekspertiza/2020/3/1003945212020031008>.

Янушевич О.О., Андреева С.Н., Золотницкий И.В. Правовые аспекты осложнений терапевтического стоматологического лечения. Российская стоматология. 2025; 18(3): 81–87. DOI: 10.17116/rosstomat20251803181. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/rossijskaya-stomatologiya/2025/3/1207264062025031081>.

Adserias-Garriga J. A review of forensic analysis of dental and maxillofacial skeletal trauma. Forensic Science International. 2019; 299: 80–88. DOI: 10.1016/j.forsciint.2019.03.027. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30978522>.

Emam N.M. Role of Forensic Odontology in Identification of Persons: A Review Article. Cureus. 2024; 16(3): e56570; <https://doi.org/10.7759/cureus.56570>.

Figueiredo C., Afonso A., Caramelo F., Corte-Real A. Temporomandibular joint trauma and disability assessment: A longitudinal exploratory study. Journal of Forensic and Legal Medicine. 2021; 82: 102230. DOI: 10.1016/j.jflm.2021.102230. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34385019>.

Khorwal D., Mathur G.K., Ahmed U., Daga S.S. Environmental Factors Affecting the Concentration of DNA in Blood and Saliva Stains: A Review. Journal of Forensic Science and Research. 2024; 8(1): 009–015; <https://doi.org/10.29328/journal.jfsr.1001057>.

Nuzzolese E., Pace F. Videntopsy and E-Identification: A Case Report. Indian Journal of Dental Research. 2024; 35(4): 489–491. DOI: 10.4103/ijdr.ijdr_485_24. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40045922>.

Rodrigues L.G., Barbosa K.G.N., Silva C.J.P., Alencar G.P., D'Avila S., Ferreira E.F.E., Ferreira R.C. Trends of maxillofacial injuries resulting from physical violence in Brazil. Dental Traumatology. 2020; 36(1): 69–75. DOI: 10.1111/edt.12509. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31430024>.

Sethi T.K., Nayakar R.P., Patil A.G. Cutting efficiency of welded diamond and vacuum diffusion technology burs and conventional electroplated burs on the surface changes of the teeth: an *in vitro* study. Contemporary Clinical Dentistry. 2021; 12(3): 253–258. DOI: 10.4103/ccd.ccd_261_20. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34759683>.

Информация об авторах:

Ашот Владимирович Камалян – к.м.н., ст. науч. сотрудник

E-mail: 9262465066@mail.ru; ORCID: 0009-0004-6139-0898; SPIN: 7603-6169

Евгений Христофорович Баринов – д.м.н., профессор, заслуженный врач РФ,

заслуженный деятель науки и образования РАЕ

E-mail: ev.barinov@mail.ru; ORCID: 0000-0003-4236-4219; SPIN: 2587-2821

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

FORENSIC SIGNIFICANCE OF TRACE ELEMENT COMPOSITION OF DENTAL TISSUES IN PERSONAL IDENTIFICATION

A.V. Kamalyan¹, E.H. Barinov^{2,3,4}

¹ Scientific Research Center for Forensic Examination and Research; 1 Irina Levchenko St., Moscow, 123298, Russian Federation

² Russian University of Medicine, Ministry of Health of the Russian Federation; 4 Dolgorukovskaya St., Moscow, 127006, Russian Federation;

³ Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia; 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

⁴ State Budgetary Healthcare Institution "Bureau of Forensic Medical Examination of the Moscow City Health Department"; 3 Tamy proezd, Moscow, 115516, Russian Federation

ABSTRACT. Forensic dental identification has further developed owing to the application of high-precision physico-chemical techniques enabling detection of stable trace-element profiles in hard dental tissues that reflect environmental exposure, dietary factors, and long-term exogenous influences persisting despite pronounced post-mortem changes and destruction of soft tissues.

Objective. To analyze and systematize scientific data on the forensic significance of trace-element composition of dental tissues in personal identification, taking into account analytical and isotopic methods, interpretation of geochemical markers, and differences between national and international expert approaches.

Materials and Methods. A literature search was conducted in the PubMed, Scopus, and eLIBRARY databases for the period 2000–2025; sources addressing elemental analysis of enamel, dentin, and cementum, as well as inductively coupled plasma mass spectrometry, laser ablation techniques, X-ray fluorescence, and electron-microscopic methods in forensic practice, were included in the review.

Results. It was shown that concentrations and spatial distributions of strontium, barium, lead, zinc, and copper form a stable set of chemical features suitable for reconstructing geographic origin and individual environmental exposure. High diagnostic value of laser-ablation mass spectrometry and energy-dispersive spectroscopy for localized dental tissue analysis was noted.

Conclusion. Trace-element composition of dental tissues constitutes an independent class of highly informative identification features in forensic medicine, and the integration of geochemical analyses with conventional forensic odontological examinations increases the reproducibility of expert conclusions and the effectiveness of personal identification.

KEYWORDS: dentistry, trace elements, identification, enamel, dentin.

For citation: Kamalyan A.V., Barinov E.H. Forensic significance of trace element composition of dental tissues in personal identification. *Trace elements in medicine*. 2026;27(1):24–30. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-24-30

REFERENCES

Amoev T.A., Volkov A.G., Dikopova N.Zh., Grinin V.M., Panin A.M., Volkov N.A. Complex electrical resistance of teeth and its role in electrical sensitivity testing. *Stomatology*. 2025; 104(2): 11–14. (In Russ.). URL: <https://www.media-sphera.ru/issues/stomatologiya/2025/2/1003917352025021011>.

Andreeva S.N., Gusarov A.A., Fetisov V.A. The analysis of the judicial practice of treating the civil lawsuits concerning the inadequate dental health service appeals launched by the patients in the Russian Federation during the period from 1993 to 2017. *Forensic Medical Expertise*. 2018; 61(3): 44–48. (In Russ.). DOI: 10.17116/sudmed201861344-48. URL: <https://www.media-sphera.ru/issues/sudebno-meditinskaya-ekspertiza/2018/3/1003945212018031044>.

Vagner V.D., Smirnova L.E., Zhurina A.A. The legislative framework and regulatory legal regulation of the maintenance of medical records in the provision of dental care. *Stomatology*. 2025; 104(1): 71–75. (In Russ.). URL: <https://www.media-sphera.ru/issues/stomatologiya/2025/1/1003917352025011071>.

Gazhva S.I., Manukyan A.G., Teterin A.I., Yanyшева K.A., Yakubova E.Yu. Influence of different odontopreparation methods on the structure and microelement composition of enamel. *Klinicheskaya stomatologiya*. 2023; 26(1): 24–31. (In Russ.). URL: <https://kstom.ru/ks/article/view/0105-04>.

Degtyarev N.E., Muraev A.A., Kazaryan G.G., Mukhametshin R.F., Ivanov S.S. Digital planning of dental implantation using axiography in a patient with an unfixed occlusion. *Klinicheskaya stomatologiya*. 2025; 28(1): 78–83. (In Russ.). URL: <https://kstom.ru/ks/article/view/0113-11>.

Karpova N.S., Razmakhnina E.M. Clinical case: remove or preserve. Where to put the comma? *Klinicheskaya stomatologiya*. 2024; 27(2): 166–171. (In Russ.). DOI: 10.37988/1811-153X_2024_2_166. URL: <https://kstom.ru/ks/article/view/0110-24>.

Lavrenjuk E.A. Modern aspects of quality control and safety of medical practice and examination of the quality of dental care for diseases of the pulp and periapical tissues (literature review). *Clinical Dentistry*. 2018; 4 (88): 74–79. (In Russ.). DOI: 10.37988/1811-153X_2018_4_74. URL: <https://kstom.ru/ks/article/view/0088-20>.

Losev F.F., Chibisova M.A., Tekucheva S.V. Symposium: "X-Ray and Functional Diagnostics in Dentistry and Maxillofacial Surgery. From Imaging to Artificial Intelligence". *Stomatology*. 2025; 104(5): 92–94. (In Russ.). URL: <https://www.media-sphera.ru/issues/stomatologiya/2025/5/1003917352025051092>.

- Magsumova O.A. Assessment of changes in acid resistance and mineral composition of enamel during chemical tooth whitening. *Klinicheskaya stomatologiya*. 2022;25(1):13–19. (In Russ.). DOI: 10.37988/1811-153X_2022_1_13.
- Masterova I.V., Lomiashvili L.M., Pogadaev D.V., Gabrielyan I.K., Mikhaylovskiy S.G., Postolaki A.I. Improvement of methods for morphometric studies of teeth. *Klinicheskaya stomatologiya*. 2022; 25(1): 6–12. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48156183>.
- Oidinov A.E., Islamov Sh.E., Bakhriev I.I. Forensic medical assessment of dental injuries. *Voprosy nauki i obrazovaniya*. 2020; 30(114): 29–35. (In Russ.). URL: scientificpublication.ru/images/PDF/2020/114/sudebno-meditsinskaya-ots.pdf.
- Ryabukhina M.V., Polyakova A.V. Review of modern methods of human DNA analysis relevant to forensic practice. In: The activities of law enforcement agencies in modern conditions: Collection of materials of the XXVII International Scientific and practical conference; Irkutsk; June 03, 2022. Irkutsk: East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation; 2022. Pp. 265–269. (In Russ.); <https://elibrary.ru/item.asp?id=49512617&ysclid=mlf98m8alk498237626>.
- L.N. Smerdina, Yu.G. Smerdina, A.S. Mulin, D.S. Sergeeva. The need to restore the occlusal surface of the molars. Topical issues of dentistry. Materials of the All-Russian scientific-practical conference. 2019: 105–108. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37308768>. EDN: ZDDQVF.
- Uvarova A.G., Gasparyan K.K., Ayupova F.S., Volobuev V.V., Mosesova A.S., Lovlin V.N. Diagnosis and treatment of odontomas in children: literature review and clinical cases. *Klinicheskaya stomatologiya*. 2024; 27(2): 16–21. (In Russ.). DOI: 10.37988/1811-153X_2024_2_16. URL: <https://kstorm.ru/ks/article/view/0110-03>.
- Chizhov Y.V., Khludneva N.V., Kazantseva T.V., Sargsyan I.I. Analysis of improper provision of orthopedic dental care based on the results of forensic medical examination: A clinical case. *Pacific Medical Journal*. 2025; 3: 83–88. (In Russ.). DOI: 10.34215/1609-1175-2025-3-83-88. URL: <https://www.tmj-vgmu.ru/jour/article/view/2978>.
- Shefov V.Yu., Orekhova L.Yu., Prokhorova O.V. On the issue of the need to press the matrix during restorations of the proximal surfaces of teeth. *Stomatology*. 2025; 104(3): 16–20. (In Russ.). DOI: 10.17116/stomat202510403116. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/stomatologiya/2025/3/1003917352025031016>.
- Shmarov L.A. Correlation of the results of forensic examinations with court decisions on claims against medical organizations]. *Sud Med Ekspert*. 2020; 63(3): 8–12. (In Russ.). DOI: 10.17116/sudmed2020630318. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/sudebno-meditsinskaya-ekspertiza/2020/3/1003945212020031008>.
- Yanushevich O.O., Andreeva S.V., Zolotnitsky I.V. Legal aspects of complications of therapeutic dental treatment. *Russian Journal of Stomatology*. 2025; 18(3): 81–87. (In Russ.). DOI: 10.17116/rosstomat20251803181. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/rossijskaya-stomatologiya/2025/3/1207264062025031081>.
- Adserias-Garriga J. A review of forensic analysis of dental and maxillofacial skeletal trauma. *Forensic Science International*. 2019; 299: 80–88. DOI: 10.1016/j.forsciint.2019.03.027. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30978522>.
- Emam N.M. Role of Forensic Odontology in Identification of Persons: A Review Article. *Cureus*. 2024; 16(3): e56570; <https://doi.org/10.7759/cureus.56570>.
- Figueiredo C., Afonso A., Caramelo F., Corte-Real A. Temporomandibular joint trauma and disability assessment: A longitudinal exploratory study. *Journal of Forensic and Legal Medicine*. 2021; 82: 102230. DOI: 10.1016/j.jflm.2021.102230. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34385019>.
- Khorwal D., Mathur G.K., Ahmed U., Daga S.S. Environmental Factors Affecting the Concentration of DNA in Blood and Saliva Stains: A Review. *Journal of Forensic Science and Research*. 2024; 8(1): 009–015; <https://doi.org/10.29328/journal.jfsr.1001057>.
- Nuzzolese E., Pace F. Viridentopsy and E-Identification: A Case Report. *Indian Journal of Dental Research*. 2024; 35(4): 489–491. DOI: 10.4103/ijdr.ijdr_485_24. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40045922>.
- Rodrigues L.G., Barbosa K.G.N., Silva C.J.P., Alencar G.P., D'Avila S., Ferreira E.F.E., Ferreira R.C. Trends of maxillofacial injuries resulting from physical violence in Brazil. *Dental Traumatology*. 2020; 36(1): 69–75. DOI: 10.1111/edt.12509. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31430024>.
- Sethi T.K., Nayakar R.P., Patil A.G. Cutting efficiency of welded diamond and vacuum diffusion technology burs and conventional electroplated burs on the surface changes of the teeth: an *in vitro* study. *Contemporary Clinical Dentistry*. 2021; 12(3): 253–258. DOI: 10.4103/ccd.ccd_261_20. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34759683>.

Information about the authors:

- A.V. Kamalyan** – Ph.D. (Med.), Senior Research Scientist
E-mail: 9262465066@mail.ru; ORCID: 0009-0004-6139-0898; SPIN: 7603-6169
- E.V. Barinov** – Dr.Sc. (Med.), Professor, Honored Doctor of the Russian Federation,
Honored Scientist and Educator of the Russian Academy of Natural Sciences
E-mail: ev.barinov@mail.ru; ORCID: 0000-0003-4236-4219; SPIN: 2587-2821

Conflict of interest

The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Поступила 21 декабря 2025 года
Принята к публикации 2 февраля 2026 года

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

**СУТОЧНЫЕ РИТМЫ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ
В КОНДЕНСАТЕ ВЫДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА
ПРИ РЕЦИДИВИРУЮЩЕМ БРОНХИТЕ У ДЕТЕЙ**

**С.И. Мандров, Л.А. Жданова, А.В. Шишова*, Р.М. Ларюшкина,
Т.Г. Глазова, Д.А. Семенова**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации;
Российская Федерация, 153012, г. Иваново, Шереметевский пр-кт, дом 8

РЕЗЮМЕ. Патогенетические механизмы формирования рецидивирующего бронхита остаются предметом дискуссий. Изучение биологических ритмов макро- и микроэлементов может способствовать разработке персонализированных подходов к профилактике и лечению этого заболевания.

Цель исследования – проанализировать суточную динамику содержания макроэлементов в конденсате выдыхаемого воздуха у детей с рецидивирующим бронхитом.

Материалы и методы. Обследовано 59 детей в возрасте 6–10 лет с рецидивирующим бронхитом. Контрольную группу составили 30 детей, редко болеющих респираторными заболеваниями. Оценка элементного статуса проводили неинвазивно, путем исследования конденсата выдыхаемого воздуха. Для суточного мониторинга бронхиальной проходимости по МОСвд (мгновенная объемная скорость выдоха) использовали портативный прибор «Пикфлоуметр» (Beringer Ingelheim, Германия), измеряющий этот параметр в литрах в минуту.

Результаты. Исследование показало, что у детей с рецидивирующим бронхитом отмечается смещение пиковых значений концентрации кальция и магния в трахеобронхиальном секрете (КВВ) по сравнению со здоровыми сверстниками. В острый период заболевания зафиксировано статистически значимое снижение ($p < 0,05$) среднесуточных концентраций кальция и магния в КВВ. Данный феномен может быть интерпретирован как ответ организма на воспалительный процесс, проявляющийся в усиленном разведении трахеобронхиального секрета и снижении минерального состава КВВ, а также в перераспределении электролитов и их выходе из тканевых депо, включая легочную ткань, для обеспечения функционирования защитных и адаптационных механизмов. Дополнительно у детей с рецидивирующим бронхитом выявлено повышение амплитуды колебаний уровня кальция и магния в КВВ ($p < 0,05$). В период клинического выздоровления частичное восстановление циркадианного ритма элементного состава КВВ указывает на неполную реабилитацию метаболических нарушений в легких. Дисбаланс циркадианного ритма кальция и магния в КВВ у детей с рецидивирующим бронхитом, имеющих зону риска бронхиальной обструкции, способствует персистенции и прогрессированию воспаления, формированию бронхиальной гиперреактивности и увеличению частоты обострений данного заболевания.

Выводы. Исследование суточных ритмов макро- и микроэлементов в выдыхаемом воздухе может стать ключом к пониманию причин рецидивирующего бронхита у детей. Полученные данные могут быть использованы для разработки персонализированных методов профилактики и лечения, в том числе коррекции дефицита кальция и магния и восстановления естественных биологических ритмов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кальций и магний, конденсат выдыхаемого воздуха, суточный ритм, дети, рецидивирующий бронхит.

Для цитирования: Мандров С.И., Жданова Л.А., Шишова А.В., Ларюшкина Р.М., Глазова Т.Г., Семенова Д.А. Суточные ритмы кальция и магния в конденсате выдыхаемого воздуха при рецидивирующем бронхите у детей. Микроэлементы в медицине. 2026;27(1):31–39. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-31-39.

ВВЕДЕНИЕ

Заболевания органов дыхания у детей всех возрастных групп занимают лидирующие позиции в структуре заболеваемости. Бронхиты, наиболее часто встречающиеся у детей раннего

возраста, остаются актуальной проблемой в педиатрической практике (Локшина и др., 2020; Самороднова и др., 2021). Несмотря на то, что в большинстве случаев бронхиты протекают с незначительными клиническими проявлениями,

* Адрес для переписки:

Шишова Анастасия Владимировна

E-mail: shishova@inbox.ru

они могут иметь затяжной или рецидивирующий характер. Это может привести к развитию стойкой бронхиальной гиперреактивности и в конечном итоге формированию хронических заболеваний бронхолегочной системы (Локшина и др., 2020; Марковская и др., 2021; Duan et al., 2021; Ali, 2022; Шамсиддинова, 2023).

Современные исследования (Марковская и др., 2021; Шавази и др., 2021; Лагунова и др., 2023; Лим и др., 2023; Алланазаров, 2023; Геппе и др., 2024) позволили сузить круг идентифицированных этиологических факторов и факторов риска, ассоциированных с рецидивирующим бронхитом (РБ). Тем не менее патогенетические механизмы данного заболевания остаются предметом дискуссий. Требуется дальнейшее углубленное изучение ряда ключевых аспектов патогенеза, в частности установление корреляции между особенностями воспалительного процесса и индивидуальными метаболическими характеристиками у детей, которое выходит за рамки исключительно инфекционного воздействия (Belgrave et al., 2018; Raaymakers et al., 2019; Самороднова и др., 2021; Кайтмазова, 2022).

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию нарушений элементного гомеостаза как предиктора расстройств базального метаболизма и общего обмена веществ (Пилькевич и др., 2023; Королева и др., 2023). Функционирование организма, включая физиологические процессы в бронхолегочной системе, детерминировано адекватным соотношением и концентрацией электролитов в биологических средах. Кальций и магний являются одними из ключевых катионов, обеспечивающих нормальную бронхоконстрикцию. В период активного роста и развития детей, характеризующийся интенсификацией обмена данных элементов, незрелость адаптационных механизмов может обуславливать выраженные метаболические дисфункции и, как следствие, опосредованно способствовать формированию бронхиальной гиперреактивности (Каримова и др. 2022; Самороднова, 2023).

Суточные колебания уровня макро- и микроэлементов отражают естественные циклические изменения в регуляторных системах организма, способствуя его адаптации к внешним стрессовым факторам (Василенко и др., 2019). Фундаментальной причиной всех патологических состояний является нарушение синхронности биологических процессов на всех уровнях организации живого. Проявление болезни часто

начинается с десинхронизации циркадных ритмов, а процесс выздоровления завершается лишь при восстановлении временной упорядоченности ключевых физиологических систем (Губин, 2019; Губин и др., 2019). Множество работ посвящено изучению макро- и микроэлементного статуса детей при различных патологических состояниях (Чернова и др., 2021; Болотова и др., 2022). Вместе с тем остается недостаточно изученным влияние электролитов на патогенетические механизмы РБ, особенно с учетом вариабельности бронхиальной обструкции у детей разных возрастных групп (Fitzpatrick et al., 2019; Геппе и др. 2024). Отсутствие этих данных затрудняет раннее выявление детей с риском развития хронических респираторных заболеваний в будущем, а также разработку эффективных профилактических стратегий и персонализированной терапии.

Ц е л ь р а б о т ы – оценить изменения содержания макроэлементов в конденсате выдыхаемого воздуха у детей с рецидивирующим бронхитом в течение суток.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 59 детей в возрасте от 6 до 10 лет, страдающих РБ и проходивших стационарное лечение в областной клинической больнице. Для сравнения была сформирована группа из 20 детей в возрасте от 6 до 9 лет, которые редко болели респираторными заболеваниями и находились в детском оздоровительном лагере «Малышок».

От законных представителей каждого из включенных в исследование участников получено информированное добровольное согласие. Протокол исследования утвержден этическим комитетом ФГБОУ ВО Ивановский ГМУ Минздрава России (протокол № 4 от 16.04.2025)

Установление диагноза РБ основывалось на всестороннем анализе анамнеза пациента и одновременном наличии признаков респираторного, интоксикационного и катарального синдромов. Этот подход соответствовал действующим клиническим рекомендациям и классификации бронхолегочных заболеваний у детей, утвержденным Минздравом РФ (Клинические рекомендации «Острый бронхит», 2024–2025 гг.).

Для изучения локальных метаболических процессов в дыхательной системе применяли метод анализа конденсата выдыхаемого воздуха (КВВ). Этот метод является современным, полностью неинвазивным (что особенно ценно при

работе с детьми), высокочувствительным и позволяет проводить исследования многократно в течение дня (Melén et al., 2019; Терешенко и др., 2021; Валеев др., 2022).

Сбор конденсата выдыхаемого воздуха осуществляли согласно методике Г.И. Сидоренко и соавт. (1981). Для определения концентрации магния и кальция в КВВ использовали атомно-адсорбционную спектрофотометрию. Результаты выражали в миллимолях на литр (ммоль/л). Для круглосуточного наблюдения за бронхиальным тонусом, используя показатель максимальной объемной скорости выдоха (МОСвыд), применяли портативный прибор «Пикфлоуметр» (Beringer Ingelheim, Германия). Единица измерения МОСвыд – литр в минуту (л/мин). При сравнении показателей МОСвыд у разных детей использовали нормирование: результаты выражали в процентах от наилучшего значения МОСвыд, которое ребенок демонстрировал за весь период исследования (условно принятое за 100%).

Для соблюдения строгих научных стандартов, все дети придерживались строгого распорядка дня. Сбор конденсата выдыхаемого воздуха проводили каждые три часа, начиная с семи часов утра.

Для анализа полученных данных использовали статистические методы, включая стандартную программу «STATISTICA 6,0» и пакеты прикладных программ «Evrika» (приближение функции по методу наименьших квадратов – косинор-анализ, предложенный F. Halberg), «Microsoftworks» 2,0 (электронные таблицы). Параметрические количественные данные были пред-

ставлены средними значениями и стандартной ошибкой среднего ($M \pm m$). Статистическую значимость различий между зависимыми группами оценивали с применением непараметрического критерия Пирсона χ^2 (хи квадрат), значимость различий между независимыми группами данных оценивали с использованием критерия Манна–Уитни. Уровень статистической значимости различий принимали при значении $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ суточных изменений концентрации макроэлементов в КВВ у детей с РБ и здоровых детей (табл. 1) выявил существенные отклонения. В острой фазе РБ у больных детей отмечено пиковое выделение кальция в ночное время (23:30) и магния в дневное время (11:45), что контрастирует с данными контрольной группы. Эти нарушения в суточной ритмике макроэлементов КВВ служат косвенным подтверждением расстройств циркадной регуляции гомеостатических процессов в организме во время острого периода РБ.

Важно отметить, что наиболее чувствительными показателями биологических ритмов, подверженными изменениям под влиянием неблагоприятных факторов, являются средний суточный уровень (мезор) и размах колебаний (амплитуда). Амплитуда ритма, как ключевой интегральный показатель циркадианного ритма, служит неспецифическим индикатором стабильности биологической системы (Putker et al., 2018; Губин, 2019; Губин и др., 2019).

Таблица 1. Суточный ритм экскреции кальция и магния с конденсатом выдыхаемого воздуха у детей с рецидивирующим бронхитом в различные периоды заболевания (по данным косинор-анализа, $M \pm m$)

Группа детей	Показатель	Среднесуточный уровень, ммоль/л	Амплитуда, ммоль/л	Акрофаза, чч:мм
Здоровые дети	Кальций	0,61±0,02	0,007±0,01	7:50
	Магний	0,02±0,001	0,001±0,0003	22:15
Острый период РБ	Кальций	0,143±0,03 *	0,042±0,01*	23:30
	Магний	0,009± 0,001*	0,007±0,001*	11:45
Период клинического выздоровления РБ	Кальций	0,21±0,003*	0,012±0,01*	15:30
	Магний	0,03±0,005	0,002 ±0,002	23:30

Примечание: * – достоверные отличия в сравнении со здоровыми детьми, $p < 0,05$.

У детей в острой фазе РБ наблюдалось статистически значимое ($p < 0,05$) уменьшение среднесуточной концентрации кальция и магния в конденсате выдыхаемого воздуха (КВВ). В острый период бронхита, сопровождающегося воспалением, происходит разжижение трахеобронхиального секрета, из которого формируется КВВ. Это приводит к снижению концентрации минеральных веществ в КВВ и повышению его гипотоничности. Изменение уровня электролитов также связано с перераспределением кальция и магния в организме в ответ на воспалительный процесс. Эти элементы перемещаются из тканей, включая легкие, для поддержания защитных и адаптационных механизмов. Кальций необходим для работы систем, отвечающих за перекисное окисление липидов и антирадикальную защиту, а магний – для обеспечения биоэнергетических процессов (Vural et al., 2020; Гизингер и др., 2021; Даминов и др., 2023). Кроме того, снижение уровня кальция может быть связано с его расходом при интенсивном сокращении гладких мышц бронхов во время обострения заболевания (Лебедеенко и др., 2021).

В острый период РБ фиксируется существенный рост ($p < 0,05$) амплитуды колебаний концентраций кальция и магния в КВВ, что свидетельствует о перенапряжении механизмов регуляции и ослаблении адаптивных ресурсов организма. С точки зрения С.И. Степановой (1986), универсальная реакция биоритмов на стрессовое воздействие проявляется в увеличении амплитуды ритмических процессов и преобразовании высокочастотных колебаний в низкочастотные. Возрастание амплитуды обусловлено интенсификацией метаболизма внутри клеток и активацией резервных функциональных элементов. Чрезмерно высокая амплитуда биоритма создает реальную возможность для расширения диапазонов отклонения фаз составляющих его ритмов, то есть ритмов с меньшими периодами, и, как следствие, предрасполагает к десинхронизации в пределах этих ритмов.

При снижении симптомов заболевания и в период клинического выздоровления ребенка от РБ наблюдается нормализация циркадианного ритма магния и приближение момента пикового выделения кальция в КВВ к норме. Тем не менее, несмотря на указанные позитивные изменения, среднесуточный уровень кальция, выделяемого с

КВВ, остаётся пониженным ($p < 0,05$), а колебания его концентрации – повышенным. В противоположность этому, среднесуточная экскреция магния с КВВ возрастает, что, вероятно, указывает на снижение его содержания в клетках органов дыхания. Такой эффект может привести к усилению реактивности трахеобронхиального дерева, так как магний выступает ключевым регулятором активации аденилатциклазы. Этот фермент стимулирует выработку циклического АМФ (цАМФ), который, в свою очередь, препятствует высвобождению медиаторов из тучных клеток и блокирует поступление кальция в гладкомышечные клетки бронхов, что способствует их расслаблению (Берест и др., 2019; Лебедеенко и др., 2021; Лапик и др., 2025). Наблюдаемые данные указывают на то, что в период клинической ремиссии РБ метаболические процессы не восстанавливаются полностью. Учитывая роль обмена веществ как неотъемлемой части циркадианного ритма (Татевосян и др., 2022), заметим, что последствия такой взаимосвязи формируют замкнутый круг при воспалениях респираторного тракта, где метаболические нарушения, влияя на суточные биоритмы, ухудшают метаболическую дисфункцию.

Анализ электролитного состава КВВ у детей с РБ и риском развития бронхиальной обструкции (табл. 2) выявил статистически значимые отличия ($p < 0,05$) от показателей детей без признаков риска: наблюдалось снижение среднесуточного содержания кальция и увеличение амплитуды его суточных колебаний. Вероятно, уменьшение концентрации кальция в КВВ отражает увеличение его содержания в клетках дыхательных путей, таких как эпителиальные клетки, гладкомышечные клетки и тучные клетки. Кальций играет важную роль в регуляции сократительной функции гладкой мускулатуры бронхов через кальций-зависимые механизмы. Однако избыточное накопление внутриклеточного кальция может стимулировать активацию провоспалительных медиаторов, что, в свою очередь, усиливает воспалительные процессы в дыхательных путях (Xu et al., 2024). Выявленные изменения в циркадианном ритме метаболизма могут способствовать поддержанию воспаления и развитию гиперреактивности бронхов. Это создает повышенный риск частых обострений РБ и в дальнейшем формирования хронических заболеваний бронхолегочной системы.

Таблица 2. Характеристика косинор-диаграммы суточного ритма экскреции электролитов ($M \pm m$) с конденсатом выдыхаемого воздуха у детей с рецидивирующим бронхитом в зависимости от наличия зоны риска бронхиальной обструкции по параметрам МОСвд

Группа детей	Показатель	Среднесуточный уровень, ммоль/л	Амплитуда, ммоль/л	Акрофаза, чч:мм
Дети с РБ без зоны риска бронхиальной обструкции	Кальций	0,17±0,01	0,034 ± 0,01	11:30
	Магний	0,024 ± 0,007	0,005±0,0001	23:45
Дети с РБ с зоной риска бронхиальной обструкции	Кальций	0,089±0,02*	0,044 ± 0,02*	23:45
	Магний	0,024 ± 0,01	0,003 ± 0,001*	11:45

Примечание: * – достоверные отличия, $p < 0,05$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить, что у детей, страдающих РБ, наблюдается дезорганизация циркадианных ритмов минерального обмена. В остром периоде РБ отмечается статистически значимое снижение ($p < 0,05$) среднесуточных показателей, а также возрастание амплитуды колебаний ($p < 0,05$) кальция и магния в конденсате выдыхаемого воздуха. Эти изменения сопровождаются сдвигом во времени пикового выделения указанных макроэлементов.

В периоде клинического выздоровления РБ частичное восстановление суточных ритмов элементного состава КВВ указывает на незавершенность реабилитации на уровне метаболических процессов в легких. Нарушения суточного ритма кальция в конденсате выдыхаемого воздуха у детей, имеющих повышенный риск бронхиальной обструкции при РБ, способствуют поддержанию и прогрессированию воспалительного процесса, фор-

мированию гиперреактивности бронхов и повышают вероятность частых обострений РБ, а также развития хронической бронхолегочной патологии.

Исследование биоритмов макро- и микроэлементов может внести вклад в более глубокое понимание этиологических и патогенетических аспектов развития РБ, а также способствовать разработке индивидуализированных стратегий профилактики и лечения, направленных на оптимизацию минерального обмена и коррекцию нарушенных биологических ритмов.

Изучение биологических ритмов макро- и микроэлементов может помочь в более глубоком понимании причин и патогенетических механизмов формирования рецидивирующего бронхита и способствовать разработке персонализированных подходов к профилактике и лечению, направленных на оптимизацию минерального обмена и восстановлению нарушенных биологических ритмов.

ЛИТЕРАТУРА

- Аллазаров А.Б. Особенности клинического течения острого обструктивного бронхита у часто болеющих детей. Журнал кардиореспираторных исследований. 2023; 4: 43–45.
- Василенко А.М., Шарипова М.М. Дефицит микроэлементов и проблема коморбидности. Микроэлементы в медицине. 2019; 1: 4–12.
- Берест И.Е., Тананакина Т.П. Роль микроэлементного гомеостаза в патогенезе заболеваний верхних дыхательных путей. РМЖ. Медицинское обозрение. 2019; 1: 27–29.
- Болотова Н.В., Скальный А.А., Филина Н.Ю., Чередникова К.А. и др. Проявление микроэлементозов у детей с различным нутритивным статусом. Микроэлементы в медицине. 2022; 4: 62–69.
- Валеев В.В., Мингазова Э.Н., Бабаев Ю.А., Мингазов Р.Н., и др. Роль факторов риска в детском возрасте на формирование хронической обструктивной болезни легких. Менеджер здравоохранения. 2022; 9: 70–79.
- Геппе Н.А., Колосова Н.Г., Денисова В.Д., Гребенева И.В. Возможности профилактики рецидивов обструктивного бронхита у детей в сезон острых респираторных инфекций. Вопросы практической педиатрии. 2024; 2: 115–122.
- Гизингер О.А., Дадали В.А. Дефицит магния и его дотация с использованием минеральных комплексов. Терапевт. 2021; 8: 32–36.
- Губин Д.Г., Коломейчук С.Н. Точность биологических часов, хронотип, здоровье и долголетие. Тюменский медицинский журнал. 2019; 2: 14–27.

- Губин Д.Г. Хронодиагностика и хронотерапия – основа персонализированной медицины. Тюменский медицинский журнал. 2019; 1: 20–40.
- Даминов Ф.А., Набиева Ф.С. Очилов О.Ш. Биологическая роль кальция в организме человека. *Research Focus International Scientific Journal*. 2023; 2: 56–58.
- Кайтмазова Н.К. Динамика показателей иммунитета у детей с обструктивным бронхитом. *Современные вопросы био-медицины*. 2022; 1: 19–25.
- Каримова Н., Шамсиев Ф., Абдуллаев С. Дисмикрoэлементозы у детей с бронхиальной астмой и их диагностическая значимость. *Международный журнал научной педиатрии*. 2022; 1: 21–24.
- Королева А.А. Влияние марганца на нервную систему: новый взгляд. *Микроэлементы в медицине*. 2023; 2: 48–52.
- Лагунова Н.В., Семенчук Т.В., Кунцевич Е.И., Мягкая Н.О. и др. Бронхообструктивный синдром в практике педиатра (клинические случаи). *Российский педиатрический журнал*. 2023; 4: 129–136.
- Локшина Э.Э., Зайцева О.В. Рекуррентные (повторные) эпизоды бронхиальной обструкции у детей: дебют хронических заболеваний органов дыхания у взрослых? *Вопросы практической педиатрии*. 2020; 6: 79–89.
- Лебеденко А.А., Семерник О.Е., Тюрина Е.Б., Аппоева А.А. и др. Роль макроэлементов в патогенезе бронхиальной астмы у детей. *Медицинский вестник Юга России*. 2021; 2: 43–47.
- Лапик И.А., Гаппарова К.М. Макро- и микроэлементы в патогенезе и терапии бронхиальной астмы: молекулярные механизмы и доказательная база. *Микроэлементы в медицине*. 2025; 3: 3–10.
- Лим М.В., Разаев Ж.А., Шавази Н.М. Факторы риска развития рецидивирующего течения бронхообструктивного синдрома у детей. *Педиатрия им. Г.Н. Сперанского*. 2023; 1: 185–187.
- Марковская А.И., Потапова Н.Л., Гаймоленко И.Н. Эволюция паттерна бронхиальной обструкции у детей дошкольного возраста. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*. 2021; 80: 57–65.
- Пилькевич Н.Б., Марковская В.А., Яворская О.В., Смирнова А.П. Патофизиологическая связь меди с нейродегенеративными расстройствами. *Микроэлементы в медицине*. 2023; 3: 22–30.
- Самороднова Е.А. Дефицит кальция у детей: причины, последствия и возможности профилактических вмешательств. *РМЖ. Мать и дитя*. 2023; 1: 60–67.
- Самороднова Е.А., Файзуллина Р.А., Пикуза О.И., Закирова А.М. Патогенетическое значение мембранных и метаболических нарушений при бронхитах у детей. *Доктор.Ру*. 2021; 10: 18–24.
- Степанова С.И. Биоритмологические аспекта проблемы адаптации. М.: Наука, 1986. 239.
- Сидоренко Г.И., Зборовский Э.И., Левина Д.И. Атравматический метод исследования поверхностно-активных свойств легкого. *Метод. рекомендации*. Минск/ 1981: 24.
- Татевосян А.С., Быков И.М., Губарева Д.А. Метаболическое влияние на циркадные осцилляции pH и Eh в моче и слюне. *Инновационная медицина Кубани*. 2022; 4: 82–89.
- Терещенко С.Ю., Малинчик М.А., Смольникова М.В. Маркеры воспаления в конденсате выдыхаемого воздуха при бронхиальной астме. *Медицинский совет*. 2021; 16: 212–223.
- Чернова Л.Н., Скальный А.В. Взаимосвязь уровня химических элементов в волосах с различной патологией у детей с расстройствами аутистического спектра. *Врач*. 2021; 11: 61–65. [
- Шавази Н., Алланазаров А., Атаева М., Гайбулаев Ж. Современные взгляды возникновения обструктивной болезни легких у детей. *Журнал кардиореспираторных исследований*. 2021; 2: 40–43.
- Шамсиддинова, М. Особенности течения острого обструктивного бронхита у детей из группы «часто болеющие дети». *Евразийский журнал медицинских и естественных наук*. 2023; 3: 70–75..
- Ali K.M. Childhood asthma as a risk factor for adult chronic obstructive pulmonary disease: a systematic review and meta-analysis. *Expert Review of Respiratory Medicine*. 2022; 16(4): 461–467.
- Belgrave D.C.M., Granell R., Turner S.W., Curtin J.A., et al. Lung function trajectories from pre-school age to adulthood and their associations with early life factors: a retrospective analysis of three population-based birth cohort studies. *Lancet Respir. Med*. 2018; 6 (7): 526–534.
- Duan P., Wang Y., Lin R., et al. Impact of early life exposures on COPD in adulthood: A systematic review and meta-analysis. *Respirology*. 2021; 26: 1131–1151.
- Fitzpatrick A.M., Bacharier L.B., Guilbert T.W., Jackson D.J., et al. Phenotypes of Recurrent Wheezing in Preschool Children: Identification by Latent Class Analysis and Utility in Prediction of Future Exacerbation. *J. Allergy Clin. Immunol.Pract*. 2019; 7 (3): 915–924.
- Melén E., Guerra S., Hallberg J., Jarvis D., et al. COPD epidemiology with pediatric asthma care: Implications for the patient and the physician. *Pediatr Allergy Immunol*. 2019; 30: 589–597.
- Putker M., Crosby P., Feeney K.A., et al. Mammalian Circadian Period, But Not Phase and Amplitude, Is Robust Against Redox and Metabolic Perturbations. *Antioxid. Redox. Signal*. 2018; 28 (7): 507–520.
- Raaymakers M.J.A., Brand P.L.P., Landstra A.M., Brouwer M.L., et al. Episodic viral wheeze and multiple-trigger wheeze in preschool children are neither distinct nor constant patterns. A prospective multicenter cohort study in secondary care. *Pediatr. Pulmonol*. 2019; 54 (9): 1439–1446.
- Vural H., Uzun K., Uz E. Concentrations of copper, zinc and various elements in serum of patients with bronchial asthma. *J. Trace Elem. Med. Biol*. 2020; 14(2): 88–91.
- Xu Y., Qu X., Liang M., et al. Focus on the role of calcium signaling in ferroptosis: A potential therapeutic strategy for sepsis-induced acute lung injury. *Pulmonary Medicine*. 2024; 11: 1457882. DOI: 10.3389/fmed.2024.1457882.

Информация об авторах:

Сергей Иванович Мандров – д.м.н., профессор, профессор кафедры поликлинической педиатрии
SPIN: 3463-7352

Людмила Алексеевна Жданова – д.м.н., профессор, зав. кафедрой поликлинической педиатрии
ORCID: 0000-0003-2172-4465; SPIN: 7224-7822

Анастасия Владимировна Шишова – д.м.н., профессор кафедры поликлинической педиатрии
E-mail: shishova@inbox.ru; ORCID: 0000-0003-0471-0790; SPIN: 4416-1125

Раиса Матвеевна Ларюшкина – д.м.н., профессор кафедры педиатрии и неонатологии
ORCID: 0000-0001-6262-9259; SPIN: 1183-3045

Татьяна Геннадьевна Глазова – к.м.н., доцент кафедры педиатрии и неонатологии

Диана Алексеевна Семенова – студентка

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

CIRCADIAN RHYTHMS OF CALCIUM AND MAGNESIUM IN EXHALED AIR CONDENSATE IN RECURRENT BRONCHITIS IN CHILDREN

*S.I. Mandrov, L.A. Zhdanova, A.V. Shishova, R.M. Laryushkina,
T.G. Glazova, D.A. Semenova*

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ivanovo State Medical University»
of the Ministry of Health of the Russian Federation;
Sheremetevsky Prospect, Building 8, Ivanovo, 153012, Russian Federation

ABSTRACT. The pathogenetic mechanisms underlying the development of recurrent bronchitis remain a subject of debate. Studying the biological rhythms of macro- and microelements may facilitate the development of personalized approaches to the prevention and treatment of this disease.

Study Objective – to analyze the daily dynamics of macroelement levels in exhaled breath condensate in children with recurrent bronchitis (RB).

Materials and Methods. Fifty-nine children aged 6–10 years with RB were examined. The control group consisted of 30 children with a history of rare respiratory diseases. Elemental status was assessed noninvasively by examining exhaled breath condensate. A portable Peak Flow Meter (Beringer Ingelheim, Germany), measuring this parameter in L/min, was used for 24-hour monitoring of bronchial patency using the MOS exhaled air flow meter.

Results. The study showed that children with RB exhibit a shift in peak calcium and magnesium concentrations in tracheobronchial secretions (TBS) compared to healthy peers. During the acute phase of RB, a statistically significant decrease ($p < 0.05$) in average daily calcium and magnesium concentrations in the TBS was recorded. This phenomenon can be interpreted as the body's response to the inflammatory process, manifested by increased dilution of tracheobronchial secretions and a decrease in the mineral composition of the TBS, as well as the redistribution of electrolytes and their release from tissue depots, including lung tissue, to ensure the functioning of protective and adaptive mechanisms. Additionally, children with RB exhibited an increase in the amplitude of calcium and magnesium fluctuations in the TBS ($p < 0.05$). During the period of clinical recovery from RB, partial restoration of the circadian rhythm of the elemental composition of the TBS indicates incomplete rehabilitation of metabolic disorders in the lungs. An imbalance in the circadian rhythms of calcium and magnesium in the EBC in children with RB who are at risk for bronchial obstruction contributes to the persistence and progression of inflammation, the formation of bronchial hyperreactivity and an increase in the frequency of exacerbations of RB.

Conclusions. Studying the circadian rhythms of macro- and microelements in exhaled air may be key to understanding the causes of recurrent bronchitis in children. The data obtained can be used to develop personalized prevention and treatment methods, including correction of calcium and magnesium deficiency and restoration of natural biological rhythms.

KEYWORDS: calcium and magnesium, exhaled air condensate, circadian rhythm, children, recurrent bronchitis.

For citation: Mandrov S.I., Zhdanova L.A., Shishova A.V., Laryushkina R.M., Glazova T.G., Semenova D.A. Circadian rhythms of calcium and magnesium in exhaled air condensate in recurrent bronchitis in children. Trace elements in medicine. 2026;27(1):31–39. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-31-39

REFERENCES

Allanazarov A.B. Clinical features of acute obstructive bronchitis in frequently ill children. Journal of Cardiorespiratory Research. 2023; 4: 43–45. (In Russ.).

- Vasilenko A.M., Sharipova M.M. Microelement deficiency and the problem of comorbidity. *Microelements in medicine*. 2019; 1: 4–12. (In Russ.).
- Berest I.E., Tananakina T.P. The role of microelement homeostasis in the pathogenesis of upper respiratory tract diseases. *RMJ. Medical Review*. 2019; 1: 27–29. (In Russ.).
- Bolotova N.V., Skalny A.A., Filina N.Yu., Cherednikova K.A. et al. Manifestation of microelementoses in children with different nutritional status. *Microelements in Medicine*. 2022; 4: 62–69. (In Russ.).
- Valeev V.V., Mingazova E.N., Babaev Yu.A., Mingazov R.N., et al. The role of childhood risk factors on the development of chronic obstructive pulmonary disease. *Healthcare Manager*. 2022; 9: 70–79. (In Russ.).
- Gepe N.A., Kolosova N.G., Denisova V.D., Grebeneva I.V. Possibilities of preventing relapses of obstructive bronchitis in children during the season of acute respiratory infections. *Issues of Practical Pediatrics*. 2024; 2: 115–122. (In Russ.).
- Gizinger O.A., Dadali V.A. Magnesium deficiency and its supplementation using mineral complexes. *Therapist*. 2021; 8: 32–36. (In Russ.).
- Gubin D.G., Kolomeichuk S.N. Biological clock accuracy, chronotype, health and longevity. *Tyumen Medical Journal*. 2019; 2: 14–27. (In Russ.).
- Gubin D.G. [Chronodiagnosics and chronotherapy are the basis of personalized medicine]. *Tyumen Medical Journal*. 2019; 1: 20–40. (In Russ.).
- Daminov F.A., Nabieva F.S., Ochilov O.Sh. Biological role of calcium in the human body. *Research Focus International Scientific Journal*. 2023; 2: 56–58 (in Russ.).
- Kaitmazova N.K. Dynamics of immunity parameters in children with obstructive bronchitis. *Modern issues of biomedicine*. 2022; 1: 19–25. (In Russ.).
- Karimova N., Shamsiev F., Abdullaev S. Dymicroelementoses in children with bronchial asthma and their diagnostic significance. *International Journal of Scientific Pediatrics*. 2022; 1: 21–24. (in Russ.).
- Koroleva A.A. The effect of manganese on the nervous system: a new look. *Microelements in Medicine*. 2023; 2: 48–52. (In Russ.).
- Lagunova N.V., Semenchuk T.V., Kuntsevich E.I., Myagkaya N.O., et al. Broncho-obstructive syndrome in pediatric practice (clinical cases). *Russian Pediatric Journal*. 2023; 4: 129–136. (In Russ.).
- Lokshina E.E., Zaitseva O.V. Recurrent (repeated) episodes of bronchial obstruction in children: the onset of chronic respiratory diseases in adults? *Issues of Practical Pediatrics*. 2020; 6: 79–89. (In Russ.).
- Lebedenko A.A., Semernik O.E., Tyurina E.B., Appoeva A.A., et al. The role of macronutrients in the pathogenesis of bronchial asthma in children. *Medical Bulletin of the South of Russia*. 2021; 2: 43–47 (in Russ.).
- Lapik I.A., Gapparova K.M. Macro- and microelements in the pathogenesis and treatment of bronchial asthma: molecular mechanisms and evidence base. *Microelements in Medicine*. 2025; 3: 3–10. (In Russ.).
- Lim M.V., Razaev Zh.A., Shavazi N.M. Risk factors for the development of recurrent broncho-obstructive syndrome in children. *Pediatrics named after G.N. Speransky*. 2023; 1: 185–187. [In Russ.).
- Markovskaya A.I., Potapova N.L., Gaimolenko I.N. Evolution of the pattern of bronchial obstruction in preschool children. *Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*. 2021. Issue 80. 57–65. (In Russ.).
- Pilkevich N.B., Markovskaya V.A., Yavorskaya O.V., Smirnova A.P. Pathophysiological relationship of copper with neurodegenerative disorders. *Microelements in Medicine*. 2023; 3: 22–30. (In Russ.).
- Samorodnova E.A. Calcium deficiency in children: causes, consequences, and possibilities of preventive interventions. *RMJ. Mother and Child*. 2023; 1:60–67. (In Russ.).
- Samorodnova E.A., Fayzullina R.A., Pikuza O.I., Zakirova A.M. Pathogenetic significance of membrane and metabolic disorders in bronchitis in children. *Doctor.Ru*. 2021; 10: 18–24. (In Russ.).
- Stepanova S.I. Biorhythmological aspects of the adaptation problem. Moscow: Nauka. 1986: 239 (in Russ.).
- Sidorenko G.I., Zborovsky E.I., Levina D.I. Atraumatic method for studying the surface-active properties of the lung. *Methodological recommendations*. Minsk. 1981: 24. (In Russ.).
- Tatevosyan A.S., Bykov I.M., Gubareva D.A. Metabolic influence on circadian oscillations of pH and Eh in urine and saliva. *Innovative Medicine of Kuban*. 2022; 4: 82–89. (In Russ.).
- Tereshchenko S.Yu., Malinchik M.A., Smolnikova M.V. Inflammatory markers in exhaled air condensate in bronchial asthma. *Medical Council*. 2021; 16: 212–223. (In Russ.).
- Chernova L.N., Skalny A.V. Relationship between the level of chemical elements in hair and various pathologies in children with autism spectrum disorders. *Doctor*. 2021; 11: 61–65. [In Russ.).
- Shavazi N., Allanazarov A., Ataeva M., Gaibulaev Zh. Current views on the occurrence of obstructive pulmonary disease in children. *Journal of Cardiorespiratory Research*. 2021; 2: 40–43. (In Russ.).
- Shamsiddinova, M. Features of the course of acute obstructive bronchitis in children from the group of "frequently ill children". *Eurasian Journal of Medical and Natural Sciences*. 2023; 3: 70–75. (In Russ.).
- Ali K.M. Childhood asthma as a risk factor for adult chronic obstructive pulmonary disease: a systematic review and meta-analysis. *Expert Review of Respiratory Medicine*. 2022; 16(4): 461–467.
- Belgrave D.C.M., Granell R., Turner S.W., Curtin J.A., et al. Lung function trajectories from pre-school age to adulthood and their associations with early life factors: a retrospective analysis of three population-based birth cohort studies. *Lancet Respir. Med*. 2018; 6 (7): 526–534.
- Duan P., Wang Y., Lin R., et al. Impact of early life exposures on COPD in adulthood: A systematic review and meta-analysis. *Respirology*. 2021; 26: 1131–1151.

Fitzpatrick A.M., Bacharier L.B., Guilbert T.W., Jackson D.J., et al. Phenotypes of Recurrent Wheezing in Preschool Children: Identification by Latent Class Analysis and Utility in Prediction of Future Exacerbation. *J. Allergy Clin. Immunol.Pract.* 2019; 7 (3): 915–924.

Melén E., Guerra S., Hallberg J., Jarvis D., et al. COPD epidemiology with pediatric asthma care: Implications for the patient and the physician. *Pediatr Allergy Immunol.* 2019; 30: 589–597.

Putker M., Crosby P., Feeney K.A., et al. Mammalian Circadian Period, But Not Phase and Amplitude, Is Robust Against Redox and Metabolic Perturbations. *Antioxid. Redox. Signal.* 2018; 28 (7): 507–520.

Raaymakers M.J.A., Brand P.L.P., Landstra A.M., Brouwer M.L., et al. Episodic viral wheeze and multiple-trigger wheeze in preschool children are neither distinct nor constant patterns. A prospective multicenter cohort study in secondary care. *Pediatr. Pulmonol.* 2019; 54 (9): 1439–1446.

Vural H., Uzun K., Uz E. Concentrations of copper, zinc and various elements in serum of patients with bronchial asthma. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2020; 14(2): 88–91.

Xu Y., Qu X., Liang M., et al. Focus on the role of calcium signaling in ferroptosis: A potential therapeutic strategy for sepsis-induced acute lung injury. *Pulmonary Medicine.* 2024; 11: 1457882. DOI: 10.3389/fmed.2024.1457882.

Information about the authors:

S.I. Mandrov – Dr.Sc. (Med.), Professor, Professor of the Department of Outpatient Pediatrics
SPIN: 3463-7352

L.A. Zhdanova – Dr.Sc. (Med.), Professor, Head of the Department of Outpatient Pediatrics
ORCID: 0000-0003-2172-4465; SPIN: 7224-7822

A.V. Shishova – Dr.Sc. (Med.), Professor of the Department of Outpatient Pediatrics
E-mail: shishova@inbox.ru; ORCID: 0000-0003-0471-0790; SPIN: 4416-1125

I.V. Ivanova – Dr.Sc. (Med.), Professor of the Department of Outpatient Pediatrics
ORCID: 0000-0002-3553-4470; SPIN: 2074-6669

R.M. Laryushkina – Dr.Sc. (Med.), Professor of the Department of Pediatrics and Neonatology
ORCID: 0000-0001-6262-9259; SPIN: 1183-3045

T.G. Glazova – Associate Professor of the Department of Pediatrics and Neonatology

D.A. Semenova – Student

Conflict of interest

The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Поступила 30 декабря 2025 года
Принята к публикации 25 февраля 2026 года

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ЭЯКУЛЯТА, ВОЛОС И СЫВОРОТКИ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ИДИОПАТИЧЕСКОГО МУЖСКОГО БЕСПЛОДИЯ У ЖИТЕЛЕЙ СЕВЕРНОГО РЕГИОНА (ХМАО-ЮГРА)

О.С. Белик*

БУ «Окружная клиническая больница»;
Российская Федерация, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Калинина, д. 40

РЕЗЮМЕ. Идиопатическое мужское бесплодие (ИМБ) составляет до 60% случаев нарушений фертильности, а его патогенез, особенно в условиях экологически неблагоприятных северных регионов, остаётся малоизученным. Дисбаланс микроэлементов рассматривается как значимое патогенетическое звено ИМБ. Однако комплексные исследования с построением прогностических моделей, одновременно оценивающие профиль в эякуляте, волосах и крови, отсутствуют.

Цель исследования – выявить специфический для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО-Югра) профиль дисбаланса микроэлементов в трёх биосредах у мужчин с ИМБ и построить на его основе многопараметрическую прогностическую модель.

Материалы и методы. Проведено проспективное сравнительное исследование «случай-контроль» с участием 120 мужчин (70 – с ИМБ, 50 – фертильный контроль), постоянно проживающих в регионе не менее 5 лет. Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) определены концентрации 12–15 микроэлементов в эякуляте, волосах и сыворотке крови. Для анализа использованы U-критерий Манна-Уитни, ROC-анализ и пошаговая бинарная логистическая регрессия.

Результаты. Выявлен специфический микроэлементный профиль ИМБ, характеризующийся в эякуляте дефицитом фосфора, цинка, меди, селена; в волосах – повышением магния, цинка, ртути, свинца и снижением железа, меди, селена, йода; в сыворотке – снижением цинка и селена. ROC-анализ выделил наиболее информативные маркеры ($AUC > 0,80$): магний в волосах (0,897), йод в волосах (0,831), свинец в волосах (0,818) и фосфор в эякуляте (0,797). Логистическая регрессия включила в итоговую модель 6 предикторов: повышенный уровень магния и свинца, сниженный уровень селена и железа в волосах; сниженный уровень селена в сыворотке; сниженный уровень фосфора в эякуляте. Модель показала выдающуюся дискриминационную способность: $AUC = 0,987$ (95% ДИ: 0,946–0,999), чувствительность 98,6%, специфичность 92%, общая точность классификации 95,8%.

Заключение. Впервые описан комплексный регион-ассоциированный профиль дисбаланса микроэлементов при ИМБ и построена высокоточная прогностическая модель на его основе. Полученные данные открывают путь для персонализированной, таргетной диагностики и коррекции микроэлементного дисбаланса как ключевого патогенетического компонента ИМБ у жителей северных промышленных регионов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: идиопатическое мужское бесплодие, микроэлементы, ROC-анализ, логистическая регрессия, прогностическая модель, северный регион, ХМАО-Югра.

Для цитирования: Белик О.С. Прогностическая значимость микроэлементного состава эякулята, волос и сыворотки крови в диагностике идиопатического мужского бесплодия у жителей Северного региона (ХМАО-Югра). Микроэлементы в медицине. 2026;27(1):40–51. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-40-51.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема мужского бесплодия остается одной из наиболее значимых медико-социальных проблем современного здравоохранения. Согласно глобальным оценкам, нарушения фертильности затрагивают около 15–25% пар репродуктив-

ного возраста, причем вклад мужского фактора в структуру бесплодного брака достигает 50% и продолжает неуклонно расти (Agarwal et al., 2021; Cox et al., 2022). Особую диагностическую и терапевтическую сложность представляет идиопатическое мужское бесплодие (ИМБ), ко-

* Адрес для переписки:
Белик Олег Сергеевич
E-mail: belik.o.s@mail.ru

торое устанавливается в тех случаях, когда стандартный диагностический алгоритм не выявляет типичных причин нарушения сперматогенеза. Распространенность ИМБ варьирует от 30 до 60%, что делает поиск его патогенетических основ и объективных биомаркеров первостепенной задачей андрологии и репродуктологии (Ефремов и др., 2022; Minhas et al., 2025).

В последние десятилетия значительное внимание в патогенезе ИМБ уделяется изучению роли микроэлементов. Эссенциальные микронутриенты, такие как цинк (Zn), селен (Se), медь (Cu), железо (Fe) и йод (I), являются кофакторами ключевых ферментов, участвующих в процессах синтеза стероидных гормонов, антиоксидантной защите, стабилизации мембран и ДНК сперматозоидов (Chao et al., 2023; Wroblewski et al., 2024). Вместе с тем токсичные элементы, в частности свинец (Pb) и ртуть (Hg), обладают выраженным гонадотоксическим действием, индуцируя оксидативный стресс и повреждая генетический материал половых клеток (Giulioni et al., 2025). Таким образом, дисбаланс микроэлементного гомеостаза может являться значимым, однако зачастую недооцениваемым, патогенетическим звеном в развитии репродуктивной дисфункции.

Особую актуальность проблема микроэлементного дисбаланса приобретает для населения, проживающего в регионах с экстремальными климатогеографическими и геохимическими условиями, каковым является Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО-Югра).

Формирующийся у жителей северных территорий сочетанный дефицит эссенциальных и избыток токсичных элементов не является случайным феноменом, а представляет собой системную проблему, детерминированную совокупностью взаимосвязанных факторов.

Во-первых, ключевую роль играют геохимические аномалии почв и водных источников, характерные для региона, которые приводят к изначально несбалансированному поступлению элементов в организм (Корчин и др., 2018; Сысо и др., 2018). Низкое содержание микроэлементов в почвах напрямую приводит к их недостатку в местной растительной пище, что исключает возможность естественной компенсации дефицита за счет традиционного питания (Опекунова и др., 2024).

Во-вторых, суровые климатические условия (дефицит солнечной инсоляции, фотопериодизм, низкие температуры) создают хронический стресс,

повышая потребность в микронутриентах для поддержания адаптационного резерва и нарушая процессы их усвоения (Бикбулатова и др. 2023; Луговая и др., 2024).

В-третьих, значимый вклад вносит алиментарный фактор: традиционный рацион, обедненный свежими овощами, фруктами и морепродуктами – основными источниками многих эссенциальных микроэлементов – усугубляет дефицитные состояния (Никифорова и др., 2018).

Наконец, социально-экономические аспекты и особенности производственной деятельности в регионе (нефтегазовый комплекс) могут способствовать дополнительному техногенному воздействию, включая накопление токсичных тяжелых металлов. В результате формируется состояние специфической дизэлементозной преморбидности, характерное для жителей Севера, которое служит основой для развития экологически-детерминированной патологии, в том числе нарушений репродуктивного здоровья (Скальный и др., 2020).

Несмотря на растущее количество работ, посвященных роли отдельных микроэлементов в мужской фертильности, в современной литературе сохраняется дефицит комплексных исследований, одновременно оценивающих широкий спектр элементов в различных биологических средах.

Традиционный анализ сыворотки крови отражает лишь краткосрочные изменения гомеостаза. В то же время исследование волос, являясь интегральным методом, позволяет оценить уровень воздействия элементов в течение нескольких месяцев, что особенно ценно для мониторинга хронического воздействия в условиях Севера (Скальный и др., 2020). Наиболее информативной с точки зрения непосредственного влияния на функцию сперматозоидов является оценка микроэлементного состава эякулята, отражающего локальную биохимическую среду (Chen et al., 2025).

Таким образом, сопоставление данных, полученных из этих трех сред, представляется наиболее полным подходом для понимания патогенеза ИМБ.

Однако на сегодняшний день отсутствуют исследования, в которых бы на основе комплексного микроэлементного профиля (эякулят, волосы, кровь) с применением современных методов многомерной статистики строились прогностические модели для диагностики ИМБ, особенно в контексте экологически неблагоприятных северных регионов.

Ц е л ь и с с л е д о в а н и я – выявить специфический регион-ассоциированный про-

филь дисбаланса микроэлементов в эякуляте, волосах и сыворотке крови у мужчин с идиопатическим бесплодием, проживающих в ХМАО-Югре, и на его основе построить многопараметрическую прогностическую модель для стратификации риска и определения потенциальных терапевтических мишеней.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования и этические аспекты. Проспективное сравнительное исследование «случай-контроль» выполнено в период с 2021 по 2025 гг. на базе лаборатории вспомогательных репродуктивных технологий БУ «Окружная клиническая больница» (ХМАО-Югра).

Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации и Национальным стандартом РФ ГОСТ Р 52379-2005 «Надлежащая клиническая практика».

Протокол исследования одобрен Локальным этическим комитетом Ханты-Мансийской государственной медицинской академии (протокол № 174 от 16.11.2021).

Все участники подписали добровольное информированное согласие.

Участники исследования. В исследование было включено 120 мужчин в возрасте от 20 до 45 лет, постоянно проживающих на территориях Крайнего Севера или приравненных к ним местностях не менее пяти лет.

Группа I – основная группа ($n=70$): мужчины с верифицированным диагнозом идиопатической олиго-, астено- и/или тератозооспермии (по критериям ВОЗ, 2021), состоящие в бесплодном браке не менее 12 мес.

Группа II – группа сравнения ($n=50$): мужчины с подтвержденной фертильностью (наличие здоровых детей), нормоспермией по результатам спермограммы и сопоставимые по возрасту и длительности проживания в регионе.

Критерии исключения: варикоцеле; инфекционно-воспалительные заболевания уrogenитального тракта; эндокринные нарушения (гипогонадизм, патология щитовидной железы); генетические причины бесплодия (микроделеции Y-хромосомы, кариотипические аномалии); пороки развития репродуктивной системы; острые или хронические соматические заболевания в стадии декомпенсации; прием препаратов микроэлементов или биологически активных добавок в течение 6 мес., предшествующих исследованию.

Забор и подготовка биологических образцов. Эякулят получали путем мастурбации в стерильный контейнер после 1 дня полового воздержания. Образцы центрифугировали при 3000 об/мин в течение 25 мин для получения спермоплазмы, которую алиquotировали и хранили при -80°C .

Сыворотка крови: венозную кровь забирали утром натощак в пробирки VACUETTE® с активатором свертывания. После центрифугирования (2000 об/мин, 15 мин) сыворотку алиquotировали и хранили при -80°C .

Волосы: образцы длиной 3–4 см состригали с затылочной области, помещали в бумажные конверты и хранили при комнатной температуре.

Определение содержания биоэлементов. Количественный анализ биоэлементов проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в аккредитованной лаборатории «Центр биотической медицины» (Москва, Россия; сертификат ISO 9001:2008). Измерения выполняли на спектрометре NexION 300D (PerkinElmer Inc., США) с автоматическим дозатором ESI SC-2 DX4 (Elemental Scientific Inc., США). Калибровку осуществляли с использованием стандартов Universal Data Acquisition Standards Kit (PerkinElmer Inc., США).

В спермоплазме определяли содержание K, Ca, Mg, P, Fe, Zn, Cu, Se, Mn, Hg, Pb, Cd. В сыворотке крови анализировали уровни K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Se, I, Mn, Co, Cr, Mo. В волосах определяли концентрации K, Na, Ca, Mg, P, Fe, Zn, Cu, Se, I, Mn, Co, Cr, Hg, Pb.

Контроль качества проводили с использованием сертифицированных референтных материалов: ClinChek® Ejaculate Control и ClinChek® Plasma Control (Recipe, Германия), а также GBW09101 для волос (SINR, Китай).

Статистический анализ. Статистический анализ выполняли с использованием программ Statistica 13.3 (TIBCO Software Inc., США) и MedCalc версии 22.013 (MedCalc Software Ltd, Бельгия). Поскольку распределение большинства количественных показателей отличалось от нормального (критерий Шапиро–Уилка), данные представлены в виде медианы (Me) и 25-го и 75-го перцентилей. Для сравнения групп применяли U-критерий Манна–Уитни. Статистическую значимость устанавливали при $p < 0,05$.

Для элементов, показавших значимые различия, был проводили ROC-анализ с определением площади под кривой (AUC – Area Under the

Curve), ее 95% доверительного интервала (95% ДИ), оптимального порогового значения, чувствительности, специфичности и индекса Юдена (J – Youden’s index, максимальная сумма чувствительности и специфичности минус 1).

Для построения прогностической модели использовали пошаговый бинарный логистический регрессионный анализ. В качестве зависимой переменной (Y) выступала групповая принадлежность (1 – пациенты с бесплодием, 0 – фертильный контроль). Независимыми переменными-кандидатами служили бинарные показатели на основе порогов ROC-анализа. Критерии включения и исключения переменных в модель составляли $p < 0,05$ и $p > 0,10$ соответственно. Качество итоговой модели оценивали по критерию Хосмера–Лемешоу, псевдо- R^2 Найджелкерке, общей точности классификации, а также чувствительности, специфичности, положительной (PPV) и отрицательной (NPV) прогностической ценности. Для независимых предикторов в модели рассчитывали коэффициент регрессии (β), отношение шансов (OR – Odds Ratio) и его 95%-ный доверительный интервал (95% ДИ).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Клинико-антропометрическая характеристика обследованных групп представлена в табл. 1. Группы были сопоставимы по возрасту, росту и массе тела ($p > 0,05$), однако у мужчин с ИМБ достоверно чаще регистрировался более высокий индекс массы тела (ИМТ) – 27,4 [25,7–29,7] против 26,5 [25,4–27,1] кг/м² в группе сравнения ($p = 0,026$).

Сравнительный анализ микроэлементного состава трех биосред выявил ряд статистически значимых различий между группами (табл. 2). В эякуляте у мужчин основной группы концентрации фосфора, цинка, меди и селена были значительно ниже, чем в группе сравнения. В волосах у пациентов с ИМБ зафиксирован более высокий уровень магния, цинка, ртути и свинца, но более низкий – железа, меди, селена и йода. В сыворотке крови значимые различия были обнаружены только для цинка и селена, уровни которых также оказались сниженными в основной группе.

Для оценки диагностической ценности каждого из выявленных значимых элементов был проведен ROC-анализ (табл. 3). Наибольшей разделяющей способностью ($AUC > 0,80$) обладали: повышенный уровень магния в волосах ($AUC=0,897$), сниженный уровень йода в волосах ($AUC=0,831$), повышенный уровень свинца в волосах ($AUC=0,818$) и сниженный уровень фосфора в эякуляте ($AUC=0,797$).

С целью выявления наиболее мощной комбинации маркеров выполнен пошаговый бинарный логистический регрессионный анализ. В финальную модель вошли шесть предикторов (табл. 4). Наибольшую независимую прогностическую силу имели повышенный уровень магния в волосах ($OR=152,04$, $p < 0,001$) и сниженный уровень селена в сыворотке крови ($OR=39,13$, $p=0,026$) и волосах ($OR=32,91$, $p=0,009$). Вклад сниженного фосфора в эякуляте и железа в волосах, хотя и не достиг порога статистической значимости при $p < 0,05$, улучшил общую точность модели.

Таблица 1. Характеристика пациентов исследуемых групп

Показатель	Обследуемая группа мужчин ($n=120$)		p
	Группа I ($n=70$)	Группа II ($n=50$)	
	Me [25–75-й перцентиль]	Me [25–75-й перцентиль]	
Возраст, лет	34 [29,8–39,8]	34 [26,8–39]	0,3821
Рост, см	176 [173–178,8]	176 [173–178]	0,9531
Масса тела, кг	84,5 [78,8–94,8]	83 [78–86]	0,1047
ИМТ, кг/м ²	27,4 [25,7–29,7]	26,5 [25,4–27,1]	0,026

Таблица 2. Содержание биоэлементов в эякуляте (мкг/проба), волосах (мкг/г) и сыворотке крови (мкг/мл) у мужчин основной группы (n=70) и группы сравнения (n=50), представленное как медиана и [25–75-й перцентиль]

Элемент	Эякулят			Волосы			Сыворотка крови		
	Группа I	Группа II	<i>p</i>	Группа I	Группа II	<i>p</i>	Группа I	Группа II	<i>p</i>
K	1173,5 [884–1816]	1065,5 [758–1464]	0,0984	90,4 [61,4–129,8]	114,3 [68,9–178,9]	0,086	199 [164–228]	211 [183–231]	0,1374
Na	–	–	–	451,4 [332,4–583,6]	432,3 [328,6–555]	0,7134	–	–	–
Ca	610 [392–998]	597 [402–1158]	0,4277	535,1 [419,5–688,3]	504 [394–615,7]	0,057	107 [100–113]	104,5 [100–114]	0,9299
Mg	117 [66–254]	125 [67–246]	0,9004	107,5 [87,4–133,1]	65 [51,4–78,6]	<0,001	21,6 [20,7–22,8]	22,5 [20,7–23,9]	0,1244
P	708 [566–1108]	1393 [1063–1778]	<0,001	271,6 [197,1–309,8]	230,5 [162–279,5]	0,0283	–	–	–
Fe	1,23 [0,86–2,97]	1,48 [0,57–2,81]	0,7394	23,2 [18,2–27,9]	33,6 [22,4–44,8]	<0,001	0,985 [0,67–1,39]	1,235 [0,63–1,73]	0,112
Zn	154 [93–227]	220,5 [146–387]	0,0015	257,1 [214,7–348,3]	199,7 [153,4–249]	<0,001	1,015 [0,73–1,12]	1,05 [0,89–1,31]	0,0089
Cu	0,195 [0,14–0,32]	0,255 [0,17–0,54]	0,0195	11,6 [8,9–13,6]	14,4 [11,9–16,6]	<0,001	0,815 [0,75–1,1]	0,975 [0,76–1,42]	0,2033
Se	0,06 [0,04–0,12]	0,115 [0,05–0,23]	0,0016	0,58 [0,46–0,78]	0,68 [0,59–0,78]	0,0189	0,082 [0,072–0,09]	0,09 [0,082–0,11]	<0,001
I	–	–	–	0,55 [0,39–0,69]	0,77 [0,65–0,89]	<0,001	0,064 [0,058–0,08]	0,0665 [0,057–0,08]	0,9087
Mn	0,05 [0,02–0,14]	0,06 [0,03–0,15]	0,5108	1,43 [1–2,3]	1,39 [0,77–2,1]	0,1746	0,002 [0,0013–0,003]	0,0023 [0,0018–0,0034]	0,0725
Co	–	–	–	0,0105 [0,005–0,031]	0,0095 [0,004–0,03]	0,3794	0,0004 [0,00025–0,00069]	0,0004 [0,0002–0,0008]	0,3708
Cr	–	–	–	0,0925 [0,045–0,19]	0,096 [0,056–0,2]	0,5281	0,0014 [0,0009–0,0023]	0,00155 [0,0008–0,0023]	0,7111
Hg	0,0005 [0–0,0037]	0,00035 [0–0,002]	0,6076	1,38 [0,9–1,897]	0,83 [0,62–1,06]	<0,001	–	–	–
Pb	0,0133 [0,0056–0,037]	0,013 [0,005–0,035]	0,9851	0,887 [0,539–1,252]	0,457 [0,264–0,66]	<0,001	–	–	–
Mo	–	–	–	–	–	–	0,0008 [0,0004–0,0011]	0,0008 [0,0004–0,0011]	0,8141
Cd	0,00017 [0–0,00075]	0,00017 [0–0,0008]	0,6296	–	–	–	–	–	–

Таблица 3. **Дискриминационные характеристики значимых микроэлементов в трех биосредах по данным ROC-анализа, использованные при построении прогностической модели**

Биосреда	Элемент	AUC (95% ДИ)	<i>p</i>	Пороговое значение	Чувствительность, %	Специфичность, %	Индекс Юдена J
Эякулят	Фосфор	0,797 (0,714–0,865)	<0,0001	≤886 мкг/проба	65,71	94	0,5971
	Цинк	0,671 (0,579–0,754)	0,0007	≤250 мкг/проба	81,43	46	0,2743
	Медь	0,625 (0,532–0,712)	0,0182	≤0,57 мкг/проба	98,57	24	0,2257
	Селен	0,669 (0,578–0,753)	0,0008	≤0,08 мкг/проба	65,71	64	0,2971
Волосы	Магний	0,897 (0,828–0,945)	<0,0001	>90,3 мкг/г	71,43	94	0,6543
	Фосфор	0,618 (0,525–0,705)	0,0321	>279,5 мкг/г	48,57	76	0,2457
	Железо	0,735 (0,647–0,811)	<0,0001	≤29,73 мкг/г	84,29	62	0,4629
	Цинк	0,755 (0,668–0,829)	<0,0001	>202 мкг/г	85,71	54	0,3971
	Медь	0,740 (0,652–0,816)	<0,0001	≤13,56 мкг/г	75,71	66	0,4171
	Селен	0,626 (0,533–0,713)	0,0131	≤0,53 мкг/г	42,86	90	0,3286
	Йод	0,831 (0,752–0,893)	<0,0001	≤0,485 мкг/г	47,14	100	0,4714
	Ртуть	0,732 (0,643–0,809)	<0,0001	>1,174 мкг/г	57,14	86	0,4314
Кровь	Цинк	0,640 (0,548–0,726)	0,006	≤0,76 мкг/мл	37,14	94	0,3114
	Селен	0,741 (0,653–0,817)	<0,0001	≤0,099 мкг/мл	92,86	44	0,3686

Таблица 4. **Независимые предикторы идиопатического мужского бесплодия в многовариантной модели логистической регрессии**

Предиктор (биосреда, критерий)	Коэффициент (β)	<i>p</i>	Отношение шансов (OR)	95% ДИ для OR
Mg в волосах >90,3 мкг/г	5,024	<0,001	152,04	10,18–2270,34
Se в сыворотке ≤0,099 мкг/мл	3,669	0,026	39,13	1,55–988,19
Se в волосах ≤0,53 мкг/г	3,494	0,009	32,91	2,39–452,53
Pb в волосах >0,849 мкг/г	3,424	0,015	30,68	1,92–489,57
P в эякуляте ≤886 мкг/проба	2,338	0,055	10,36	0,95–112,82
Fe в волосах ≤29,73 мкг/г	1,837	0,089	6,28	0,76–52,01
Константа	–8,456	<0,001	–	–

Таблица 5. Качество классификации и дискриминационная способность итоговой многопараметрической логистической модели

Параметр	Значение
Псевдо-R ² (Найджелкерке)	0,893
Тест согласия (Хосмер-Лемешоу), <i>p</i>	0,999
Площадь под ROC-кривой (AUC)	0,987
95% ДИ для AUC	0,946–0,999
Общая точность классификации, %	95,8
Чувствительность, %	98,6
Специфичность, %	92,0
Положительная прогностическая ценность, %	94,5
Отрицательная прогностическая ценность, %	97,9

Итоговая логистическая регрессионная модель продемонстрировала высокую прогностическую эффективность (табл. 5). Ее дискриминационная способность, оцененная по площади под ROC-кривой (AUC), составила 0,987 (95% ДИ: 0,946–0,999). Модель корректно классифицировала 95,8% всех участников, показав чувствительность 98,6% и специфичность 92%. Тест Хосмера–Лемешоу ($p=0,999$) подтвердил хорошую калибровку модели.

Таким образом, комплексный анализ выявил устойчивые различия в микроэлементном статусе между группами, а построенная на их основе многопараметрическая модель продемонстрировала исключительно высокую дискриминационную способность.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование впервые представляет комплексный анализ микроэлементного статуса в трех ключевых биосредах – эякуляте, волосах и сыворотке крови, у мужчин с ИМБ, постоянно проживающих в условиях ХМАО-Югры. Главным результатом работы является не только выявление ряда значимых дисбалансов, но и построение высокоточной прогностической модели, интегрирующей эти данные в единый регион-ассоциированный профиль (РАП) риска.

Критически важным для интерпретации результатов является тот факт, что медианные значения большинства элементов в обеих группах находились в пределах общелабораторных референсных интервалов. Ключевым методологическим преимуществом данного исследования слу-

жит сравнение не с общей популяционной нормой, а с группой фертильных мужчин, проживающих в идентичных географических и экологических условиях. Данная группа контроля, таким образом, репрезентирует референтную модель «внутреннего (локального) оптимума» микроэлементного статуса для фертильной популяции данного региона. Статистически значимое отклонение уровня элемента в группе пациентов от данного локального оптимума (даже при сохранении в рамках общих популяционных референсов), вероятно, указывает на субклинический дисбаланс, патогенетически значимый для репродуктивной функции. Данное предположение подтверждается тем, что именно комбинация таких отклонений от контрольных значений вошла в состав предикторов высокоточного диагностического алгоритма, что свидетельствует об их совокупной патогенетической значимости. Исходя из этого, выявленные статистически значимые ($p < 0,05$) системные различия в элементном статусе между группами (табл. 2) приобретают четкую интерпретацию.

В эякуляте мужчин с ИМБ наблюдался достоверный дефицит ключевых функциональных элементов: фосфора (энергетический метаболизм), цинка (стабильность хроматина), селена (антиоксидантная защита) и меди (участие в антиоксидантных ферментных системах) (Yuan et al., 2024; Zecevic et al., 2025; Zhang et al., 2025). Это прямо указывает на локальную недостаточность, ухудшающую биохимическую среду для сперматозоидов.

Профиль микроэлементов в волосах оказался более комплексным; он, по-видимому, отражает кумулятивные адаптационные и патологические процессы, происходящие в течение нескольких месяцев. Повышенное содержание магния, цинка и фосфора в волосах пациентов с ИМБ может являться индикатором дисбаланса в их метаболизме и тканевом распределении, сформированного под влиянием хронического воздействия неблагоприятных средовых факторов. Одновременное достоверное снижение концентраций селена, йода, железа и меди в волосах может свидетельствовать либо о сниженной обеспеченности организма этими элементами, либо об их повышенном метаболическом расходе. Это особенно показательно для йода и селена, эндемичный дефицит которых в регионе является установленным фактором (Лапенко и др., 2021; Белов и др., 2025). Пониженное содержание железа и меди, участвующих в ключевых окислительно-восстановительных процессах, может от-

ражать их повышенный расход или нарушение всасывания. Таким образом, волосы выступают как интегральный индикатор, фиксирующий сочетанное воздействие эндемичного дефицита, техногенной экспозиции (повышение свинца, ртути) и сдвигов минерального гомеостаза, характерных для патологического состояния.

В сыворотке крови статистически значимые различия выявлены лишь для селена и цинка, что подтверждает ограниченную информативность данной биосреды для оценки хронического микроэлементного дисбаланса при ИМБ. Относительная стабильность уровней других элементов в сыворотке крови, вероятно, маскирует происходящие компенсаторные перераспределения и их депонирование в тканях.

Совокупность этих изменений формирует специфический РАП дисбаланса микроэлементов при ИМБ, в основе которого лежит характерная триада нарушений: сочетанный дефицит эссенциальных элементов (фосфора, селена, йода, железа и меди), дисрегуляция гомеостаза магния и цинка и накопление токсичных металлов (свинца и ртути). Подобный паттерн, возможно, отражает общие для северных промышленных регионов черты экологического и метаболического дисбаланса, однако для подтверждения этой гипотезы требуются сравнительные исследования в других географических зонах.

Построенная многопараметрическая логистическая регрессионная модель, включившая в себя наиболее информативные бинарные маркеры из РАП, продемонстрировала высокую прогностическую эффективность, что делает её надежным инструментом для выявления пациентов с ИМБ, у которых ведущим патогенетическим компонентом является выявленный комплексный микроэлементный дисбаланс, а также для определения приоритетных мишеней для персонализированной коррекции. Построенная математическая модель продемонстрировала высокую надежность (Псевдо- $R^2=0,893$) и точность ($AUC=0,987$) (Hosmer et al., 2013). При этом модель обладает сбалансированными клинически значимыми параметрами: чувствительность 98,6% минимизирует риск пропуска случая, а специфичность 92% и положительная прогностическая ценность (PPV) 94,5% указывают на высокую достоверность положительного заключения.

Важнейшим практическим достижением стало то, что для такой точной оценки не требу-

ется полный и дорогостоящий анализ всех элементов во всех средах. Для эффективной стратификации риска оказалось достаточным определение 6 параметров: уровня магния, селена, свинца и железа в волосах, селена в сыворотке крови и фосфора в эякуляте. Это открывает перспективы для практического применения полученных данных, переводя их из области научной констатации в клиническую плоскость. Каждый из этих предикторов является не просто статистическим маркером, а указанием на конкретное патогенетическое звено.

Наиболее мощным предиктором ($OR=152,04$) оказалось повышенное содержание магния в волосах. Этот феномен может быть следствием нарушения его тканевого распределения, индуцированного комплексом хронических стрессовых факторов, характерных для северного региона (ХМАО-Югра): экстремальными климатогеографическими условиями, геохимическим дисбалансом и особенностями производственной деятельности (Корчина и др., 2014; Соколов, 2020). Подобные условия могут влиять на нейроэндокринную регуляцию и трансмембранный транспорт электролитов (McEwen, 2017). Гипотетически это может приводить к относительному накоплению магния в волосах на фоне его функционального дефицита в других тканях, включая репродуктивные, однако данное предположение требует отдельной экспериментальной проверки.

В модель вошли сниженные уровни селена как в сыворотке крови ($OR=39,13$), так и в волосах ($OR=32,91$). Селен является ключевым структурным компонентом фермента глутатионпероксидазы (GPx), катализирующего обезвреживание ключевых компонентов окислительного стресса – перекиси водорода и липидных гидропероксидов. Тем самым GPx выполняет центральную роль в антиоксидантной защите семенной плазмы (Yuan et al., 2024). Эндемичный дефицит селена в регионе приводит к недостаточному синтезу этого фермента, ослабляя естественную антиоксидантную защиту сперматозоидов. На этом фоне повышенная продукция АФК, вызванная токсичным действием свинца ($OR=30,68$) и ртути, создает ситуацию неконтролируемого оксидативного стресса. В результате происходит снижение подвижности сперматозоидов, повреждение липидных мембран и фрагментация ДНК сперматозоидов.

Выявленный дефицит неорганического фосфора в эякуляте ($OR=10,36$) заслуживает особого внимания. Основным источником фосфора и дру-

гих электролитов в семенной плазме являются секреты предстательной железы и семенных пузырьков. Поэтому снижение его концентрации может косвенно указывать на нарушение функции этих органов или изменение биохимического состава их секрета, что в свою очередь ухудшает среду для созревания и подвижности сперматозоидов (Serrano et al., 2024). Этот маркер связывает микроэлементный дисбаланс с функцией конкретных органов репродуктивной системы.

Полученные результаты служат научным основанием для разработки стандартизированной схемы патогенетической терапии ИМБ у жителей региона. Предложенная модель позволяет перейти от эмпирического назначения антиоксидантов к таргетной коррекции выявленного типа дисбаланса. Степень отклонения маркеров от пороговых значений может служить ориентиром для интенсивности вмешательства. Таким образом, работа предлагает новый принцип подхода к терапии ИМБ – таргетную коррекцию специфического микроэлементного дисбаланса, выявленного у пациента. Этот принцип, впервые реализованный для условий ХМАО-Югры, открывает перспективы для создания аналогичных регион-ориентированных протоколов.

Ограничения исследования включают в себя объём выборки и перекрёстный дизайн работы, не позволяющий сделать однозначные выводы о причинно-следственной связи между выявленным микроэлементным дисбалансом и развитием бесплодия. Высокая точность построенной прогностической модели требует проверки на независимой когорте для подтверждения её воспроизводимости и клинической применимости. Несмотря на это, полученные результаты формируют четкую гипотезу и задают направления для дальнейших исследований. Наиболее очевидным следующим шагом является проведение аналогичного исследования в другом северном промышленном регионе, например, в Ямало-Ненецком автономном округе

(ЯНАО), для проведения сравнительного анализа. Это позволит выяснить, является ли выявленный РАП уникальным, или же существует универсальное «ядро» микроэлементных нарушений, характерное для ИМБ со схожими климатогеографическими и экологическими условиями. Такое сравнение заложит основу для создания адаптивных, территориально-ориентированных клинических рекомендаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате комплексного исследования впервые выявлен специфический РАП дисбаланса микроэлементов при ИМБ у жителей ХМАО-Югры. Его ключевыми характеристиками является триада нарушений: сочетанный дефицит эссенциальных элементов (P, Se, I, Fe, Cu), дисрегуляция гомеостаза магния и цинка и накопление токсичных металлов (Pb, Hg).

2. На основе анализа трёх биосред (эякулят, волосы, сыворотка крови) с применением многомерной статистики построена высокоточная прогностическая логистическая модель (AUC = 0,987). Модель интегрирует шесть ключевых маркеров (Mg, Se, Pb, Fe в волосах; Se в крови; P в эякуляте) в оптимизированный алгоритм для стратификации риска ИМБ, связанного с данным типом микроэлементного дисбаланса.

3. Выделенные моделью предикторы не являются случайными статистическими ассоциациями, а указывают на конкретные патогенетические мишени: антиоксидантную недостаточность (дефицит Se), токсическую нагрузку (избыток Pb), метаболическую дисрегуляцию (нарушение обмена Mg) и возможную дисфункцию предстательной железы (дефицит P в эякуляте). Таким образом, работа впервые закладывает научное основание для перехода от эмпирической терапии к персонализированной, таргетной коррекции выявленного микроэлементного дисбаланса у мужчин с ИМБ в условиях северного промышленного региона.

ЛИТЕРАТУРА

- Белов М.А., Синдирева А.В., Пузанов Д.О., Вешкурцева С.С. Содержание селена в объектах окружающей среды и в волосах населения на территории Октябрьского района Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2025; 3: 157–162.
- Бикбулатова Л.Н., Лапенко В.В. Адаптация и здоровье населения Арктической зоны Российской Федерации: (на примере Ямало-Ненецкого автономного округа). Москва: ООО «РИТМ: издательство, технологии, медицина». 2023; 308 с.
- Ефремов Е.А., Касатонова Е.В. Актуальные и перспективные методы лечения идиопатического мужского бесплодия. Андрология и генитальная хирургия. 2022; 23(3): 48–53.
- Корчин В.И., Миняйло Л.А., Корчина Т.Я. Содержание химических элементов в водопроводной питьевой воде с различным уровнем очистки (на примере городов Ханты-мансийского автономного округа). Журнал медико-биологических исследований. 2018; 6(2): 188–197.
- Корчина Т.Я., Корчин В.И., Лапенко И.В., Ткачева С.В., Гребенюк В.Н. Климатогеографические особенности Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и их влияние на здоровье населения. Вестник угроведения. 2014; 3(18): 166–174.

- Лапенко И.В., Корчин В.И., Корчина Т.Я. Особенности состояния метаболического профиля элементного и микронутриентного статуса у коренного и пришлого населения урбанизированного Севера. Воронеж: Издательство «Ритм». 2021. 316 с.
- Луговая Е.А., Степанова Е.М. Дисбаланс химических элементов в организме жителей циркумполярного региона как отражение геохимических факторов среды. Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2024; 3(1): 153–159.
- Никифорова Н.А., Карапетян Т.А., Доршакова Н.В. Особенности питания жителей Севера (обзор литературы). Экология человека. 2018; 11: 20–22.
- Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Арестова И.Ю., Лисенков С.А. Фоновое содержание химических элементов в растениях севера Западной Сибири и его изменение под влиянием нефтегазодобычи. Сибирский экологический журнал. 2024; 31(2): 359–372.
- Скальный А.В., Киричук А.А. Химические элементы в экологии, физиологии человека и медицине. Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН). 2020. 209 с.
- Соколов С.В. Территориальный анализ уровня климатической комфортности районов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Успехи современного естествознания. 2020; 5: 82–88.
- Сысо А.И., Сиромля Т.И. Химические элементы и их соединения в почвах и растениях нативных и антропогенных экосистем Сибири. Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: материалы III Международной школы-семинара молодых исследователей. 2018; 137–150.
- Agarwal A., Baskaran S., Parekh N., Cho C.L., Henkel R., Vij S., Arafat M., Panner Selvam M.K., Shah R. Male infertility. *Lancet*. 2021; 397(10271): 319–333.
- Chen J., Tan W., Chen Z., Zhang L., Yu Y., Zhu X., Xin B. Associations of semen essential/non-essential elements with the risk of male infertility: A systematic review and meta-analysis. *Toxicology Letters*. 2025; 412: 102–113.
- Chao H-H., Zhang Y., Dong P-Y., Gurunathan S., Zhang X-F. Comprehensive review on the positive and negative effects of various important regulators on male spermatogenesis and fertility. *Frontiers in Nutrition*. 2023; 9: 1063510.
- Cox C.M., Thoma M.E., Tchangelova N., Mburu G., Bornstein M.J., Johnson C.L., Kiarie J. Infertility prevalence and the methods of estimation from 1990 to 2021: a systematic review and meta-analysis. *Human reproduction open*. 2022; 2022(4): hoac051.
- Giulioni C., Falsetti F., Maurizi V., et al. The impact of heavy metals exposure on male fertility: a scoping review of human studies. *Journal of basic and clinical physiology and pharmacology*. 2025; 36(2-3): 129–137.
- Hosmer D.W., Lemeshow S., Sturdivant R.X. *Applied Logistic Regression*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2013. 528 p.
- McEwen B.S. Neurobiological and Systemic Effects of Chronic Stress. *Chronic Stress*. 2017; 1: 2470547017692328.
- Minhas S., Boeri L., Capogrosso P., Del Giudice F., Crocetto F., Imbimbo C., Cafarelli A. European Association of Urology Guidelines on Male Sexual and Reproductive Health: 2025 Update on Male Infertility. *European urology*. 2025; 87(5): 601–616.
- Serrano R., Martin-Hidalgo D., Bilbao J., Bernardo-Seisdedos G., Millet O., Garcia-Marin L.J., Bragado M.J. Quantitative Analysis of the Human Semen Phosphorometabolome by 31P-NMR. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(3): 1682.
- Wroblewski M., Wroblewska W., Sobiesiak M. The role of selected elements in oxidative stress protection: key to healthy fertility and reproduction. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(17): 9409.
- Yuan S., Zhang Y., Dong P.Y., Chen Yan Y.M., Liu J., Zhang B.Q., Chen M.M., Zhang S.E., Zhang X.F. A comprehensive review on potential role of selenium, selenoproteins and selenium nanoparticles in male fertility. *Heliyon*. 2024; 10(15): e34975.
- Zecevic N., Veselinovic A., Perovic M., Stojisavljevic A. Association between Zinc levels and the impact of its deficiency on idiopathic male infertility: an up-to-date review. *Antioxidants*. 2025; 14(2): 165.
- Zhang J., Hu B., Wang T., Yang P., Peng X., Miao Y., Liu W., Lin X., Sun J. Causal associations of circulating micronutrients with the risk of infertility: a Mendelian randomization study. *Food science & nutrition*. 2025; 13(11): e71084.

Информация об авторе:

Олег Сергеевич Белик – врач-уролог, лаборатория вспомогательных репродуктивных технологий женской консультации перинатального центра
E-mail: belik.o.s@mail.ru; ORCID: 0009-0006-7835-7685; SPIN: 1896-3936

PROGNOSTIC VALUE OF TRACE ELEMENT PROFILES IN EJACULATE, HAIR, AND BLOOD SERUM FOR THE DIAGNOSIS OF IDIOPATHIC MALE INFERTILITY AMONG RESIDENTS OF A NORTHERN REGION (KHMAO-YUGRA)

O.S. Belik

Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Ugra "District Clinical Hospital";
40 Kalinina str., Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation

ABSTRACT. Idiopathic male infertility (IMI) accounts for up to 60% of fertility disorders, and its pathogenesis, especially in ecologically disadvantaged northern regions, remains poorly understood. Trace element imbalance is considered a significant pathogenetic factor in IMI; however, comprehensive studies simultaneously assessing profiles in ejaculate, hair, and blood, with the construction of prognostic models, are lacking.

Objective. To identify a region-specific profile of trace element imbalance in three biological matrices among

men with idiopathic male infertility (IMI) residing in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra (KhMAO-Yugra) and to build a multivariate prognostic model based on this profile.

Materials and methods. A prospective case-control study included 120 men (70 with IMI, 50 fertile controls) who had been permanent residents of the region for at least 5 years. Concentrations of 12-15 trace elements in ejaculate, hair, and blood serum were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Statistical analysis employed the Mann-Whitney U-test, ROC analysis, and stepwise binary logistic regression.

Results. A specific trace element profile of IMI was identified: in ejaculate – deficiency of P, Zn, Cu, Se; in hair – increased levels of Mg, Zn, Hg, Pb and decreased levels of Fe, Cu, Se, I; in serum – decreased levels of Zn and Se. ROC analysis identified the most informative markers (AUC>0.80): Mg in hair (0.897), I in hair (0.831), Pb in hair (0.818), and P in ejaculate (0.797). Logistic regression included 6 predictors in the final model: elevated levels of Mg and Pb, reduced levels of Se and Fe in hair; reduced level of Se in serum; reduced level of P in ejaculate. The model demonstrated outstanding discriminatory power: AUC=0.987 (95% CI: 0.946-0.999), sensitivity 98.6%, specificity 92%, overall classification accuracy 95.8%.

Conclusion. For the first time, a comprehensive specific region-associated profile (RAP) of trace element imbalance in IMI has been described, and a highly accurate prognostic model based on it has been developed. The obtained data pave the way for personalized, targeted diagnosis and correction of trace element imbalance as a key pathogenetic component of IMI in residents of northern industrial regions.

KEYWORDS: idiopathic male infertility, trace elements, ROC analysis, logistic regression, prognostic model, northern region, KhMAO-Yugra.

For citation: Belik O.S. Prognostic value of trace element profiles in ejaculate, hair, and blood serum for the diagnosis of idiopathic male infertility among residents of a Northern region (KhMAO-Yugra). *Trace elements in medicine*. 2026;27(1):40–51. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-40-51

REFERENCES

- Belov M.A., Sindireva A.V., Puzanov D.O., Veshkurtseva S.S. Selenium content in environmental objects and hair of the population in the Oktyabrsky district of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. 2025; 3: 157–162 (in Russ.).
- Bikbulatova L.N., Lapenko V.V. Adaptation and health of the population of the Arctic zone of the Russian Federation: (the case of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug). Moscow: RITM: izdatel'stvo, tekhnologii, meditsina. 2023. 308 p. (in Russ.).
- Efremov E.A., Kasatonova E.V. Current and promising methods for the treatment of idiopathic male infertility. *Andrologiya i genital'naya khirurgiya*. 2022; 23(3): 48–53 (in Russ.).
- Korchin V.I., Minyaylo L.A., Korchina T.Ya. Content of chemical elements in tap drinking water with different purification levels (case study of cities in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug). *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy*. 2018; 6(2): 188–197 (in Russ.).
- Korchina T.Ya., Korchin V.I., Lapenko I.V., Tkacheva S.V., Grebenuk V.N. Climatic and geographical features of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra and their impact on public health. *Vestnik Ugrovedenia*. 2014; 3(18): 166–174 (in Russ.).
- Lapenko I.V., Korchin V.I., Korchina T.Ya. Features of the metabolic profile of the elemental and micronutrient status in the indigenous and non-indigenous population of the urbanized North. Voronezh: Izdatel'stvo "Ritm". 2021. 316 p. (in Russ.).
- Lugovaya E.A., Stepanova E.M. Imbalance of chemical elements in the body of circumpolar region residents as a reflection of environmental geochemical factors. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Estestvennye i gumanitarnye nauki*. 2024; 3(1):153–159 (in Russ.).
- Nikiforova N.A., Karapetyan T.A., Dorshakova N.V. Dietary habits of northern residents (literature review). *Ekologiya cheloveka*. 2018; (11): 20–22 (in Russ.).
- Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Arestova I.Yu., Lisenkov S.A. Background content of chemical elements in plants of the north of Western Siberia and its change under the influence of oil and gas production. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2024, 31(2):359-372 (in Russ.).
- Skalny A.V., Kirichuk A.A. Chemical elements in ecology, human physiology and medicine. Moscow: Rossiyskiy universitet druzhby narodov (RUDN). 2020. 209 p. (in Russ.).
- Sokolov S.V. Territorial analysis of the level of climate comfort of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra. *Advances in current natural sciences*. 2020; 5: 82–88 (in Russ.).
- Syso A.I., Siromlya T.I. Chemical elements and their compounds in soils and plants of native and anthropogenic ecosystems of Siberia. In: *Biogeokhimiya khimicheskikh elementov i soedineniy v prirodnykh sredakh: materialy III Mezhdunarodnoy shkoly-seminara molodykh issledovateley*. Tomsk. 2018, p. 137-150 (in Russ.).
- Agarwal A., Baskaran S., Parekh N., Cho C.L., Henkel R., Vij S., Arafa M., Panner Selvam M.K., Shah R. Male infertility. *Lancet*. 2021; 397(10271): 319–333.
- Chen J., Tan W., Chen Z., Zhang L., Yu Y., Zhu X., Xin B. Associations of semen essential/non-essential elements with the risk of male infertility: A systematic review and meta-analysis. *Toxicology Letters*. 2025; 412: 102–113.
- Chao H-H., Zhang Y., Dong P-Y., Gurunathan S., Zhang X-F. Comprehensive review on the positive and negative effects of various important regulators on male spermatogenesis and fertility. *Frontiers in Nutrition*. 2023; 9: 1063510.
- Cox C.M., Thoma M.E., Tchangalova N., Mburu G., Bornstein M.J., Johnson C.L., Kiarie J. Infertility prevalence and the methods of estimation from 1990 to 2021: a systematic review and meta-analysis. *Human reproduction open*. 2022; 2022(4): hoac051.

Giulioni C., Falsetti F., Maurizi V., et al. The impact of heavy metals exposure on male fertility: a scoping review of human studies. *Journal of basic and clinical physiology and pharmacology*. 2025; 36(2-3): 129–137.

Hosmer D.W., Lemeshow S., Sturdivant R.X. *Applied Logistic Regression*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2013. 528 p.

McEwen B.S. Neurobiological and Systemic Effects of Chronic Stress. *Chronic Stress*. 2017; 1: 2470547017692328.

Minhas S., Boeri L., Capogrosso P., Del Giudice F., Crocetto F., Imbimbo C., Cafarelli A. European Association of Urology Guidelines on Male Sexual and Reproductive Health: 2025 Update on Male Infertility. *European urology*. 2025; 87(5): 601–616.

Serrano R., Martin-Hidalgo D., Bilbao J., Bernardo-Seisedos G., Millet O., Garcia-Marin L.J., Bragado M.J. Quantitative Analysis of the Human Semen Phosphorometabolome by 31P-NMR. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(3): 1682.

Wroblewski M., Wroblewska W., Sobiesiak M. The role of selected elements in oxidative stress protection: key to healthy fertility and reproduction. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(17): 9409.

Yuan S., Zhang Y., Dong P.Y., Chen Yan Y.M., Liu J., Zhang B.Q., Chen M.M., Zhang S.E., Zhang X.F. A comprehensive review on potential role of selenium, selenoproteins and selenium nanoparticles in male fertility. *Heliyon*. 2024; 10(15): e34975.

Zecevic N., Veselinovic A., Perovic M., Stojavljevic A. Association between Zinc levels and the impact of its deficiency on idiopathic male infertility: an up-to-date review. *Antioxidants*. 2025; 14(2): 165.

Zhang J., Hu B., Wang T., Yang P., Peng X., Miao Y., Liu W., Lin X., Sun J. Causal associations of circulating micronutrients with the risk of infertility: a Mendelian randomization study. *Food science & nutrition*. 2025; 13(11): e71084.

Information about the author:

Oleg S. Belik – Urologist, Laboratory of Assisted Reproductive Technologies of the Women's Consultation of the Perinatal Center

E-mail: belik.o.s@mail.ru; ORCID: 0009-0006-7835-7685; SPIN: 1896-3936

Поступила 23 января 2026 года

Принята к публикации 27 февраля 2026 года

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

**АНАЛИЗ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА
КОСТНОЙ ТКАНИ У ПОЖИЛЫХ ПАЦИЕНТОВ
С ПАТОЛОГИЕЙ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА****Е.А. Бондаревич*, В.В. Доржеев, В.С. Шитин, А.Ф. Старицын**ФГБОУ ВО «Читинская государственная медицинская академия» Минздрава России;
Российская Федерация, 672000, г. Чита, ул. Горького, д. 39а

РЕЗЮМЕ. Цель исследования – определение микроэлементного состава костной ткани у жителей Забайкалья, имеющих тяжёлую патологию тазобедренного сустава.

Материалы и методы. Проведено обследование 21 пациента, из них 11 (52,4%) мужчин и 10 (47,6%) женщин, перенесших эндопротезирование тазобедренного сустава. Средний возраст – 58,6 года. Нозологические формы представлены идиопатическим коксартрозом и асептическим некрозом головки бедренной кости. Определение содержания микроэлементов выполнено рентгенофлуоресцентным методом полного внешнего отражения.

Результаты. Анализ выявил значительный дисбаланс микроэлементного состава костной ткани у пациентов с идиопатическим коксартрозом и асептическим некрозом. Среднее содержание титана (Ti), хрома (Cr), марганца (Mn), железа (Fe), меди (Cu), цинка (Zn), брома (Br), стронция (Sr) и свинца (Pb) отмечалось ниже референтных значений для средней сухой костной ткани. Наиболее существенное снижение (в 2–5 раза) наблюдалось для хрома, брома, свинца, титана, железа, цинка и стронция. Напротив, уровень кобальта был в 4,2 раза выше референтного значения. Статистический анализ с использованием U-критерия Манна–Уитни не выявил значимых отличий ни от одного литературного источника ($U = 55, p = 0,34$), что свидетельствует о высокой вариабельности микроэлементного состава.

Выводы. В результате исследования установлен специфический дисбаланс микроэлементов в костной ткани у пациентов, перенесших эндопротезирование тазобедренного сустава. Выявленный дефицит эссенциальных элементов (цинка, меди, стронция) и патологическое накопление кобальта могут играть роль в патогенезе дегенеративных изменений суставов и должны учитываться при разработке комплексных реабилитационных и профилактических мероприятий для данной категории пациентов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроэлементный состав костной ткани, рентгенофлуоресцентный анализ, тазобедренный сустав.

Для цитирования: Бондаревич Е.А., Доржеев В.В., Шитин В.С., Старицын А.Ф. Анализ микроэлементного состава костной ткани у пожилых пациентов с патологией тазобедренного сустава. Микроэлементы в медицине. 2026;27(1):52–56. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-52-56.

ВВЕДЕНИЕ

Костная ткань организма человека является активным участником минерального метаболизма, регулируя уровень макро- и микроэлементов в межклеточной жидкости и крови. Минеральной основой костной ткани служит гидроксиапатит и его производные (карбонатный, стронциевый, магниевый апатиты, фторапатит и др.). Органическая основа – коллаген I типа и другие неколлагеновые белки и протеогликаны. В результате процессов ремоделирования формируется нано-биокомпозит из волокон белково-углеводного комплекса и кристаллов апатитов (Конев и др., 2018).

Костная ткань, выступая как депо микроэлементов, выполняет функцию по переводу токсичных элементов в малорастворимые и нерастворимые соединения, что понижает подвижность микроэлементов и способствует снижению их негативного воздействия на метаболизм. Этот процесс позволяет удалять экотоксиканты из организма, и данное направление биогеохимии и экологии человека включает в себя обширный материал для региона исследования (Тармаева и др., 2019; Михайлова и др., 2025).

Состав костной ткани, так же как и зубов, определяется биогеохимическими условиями региона проживания человека, его возрастом, по-

* Адрес для переписки:

Бондаревич Евгений Александрович
E-mail: bondarevich84@mail.ru

лом и особенностями питания. При развитии патологий костной ткани (остеопороз, остеопетроз) или суставного аппарата (артрозы, подагры) микроэлементный состав может существенно изменяться (Zaichick, 2013; Ихалайнен и др., 2018; Ciosek et al., 2021).

Ц е л ь и с с л е д о в а н и я – определение микроэлементного состава костной ткани у пациентов, перенесших эндопротезирование тазобедренного сустава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проведении исследования были взяты пробы костной ткани и костно-хрящевые элементы пациентов, перенесших эндопротезирование тазобедренного сустава, всего 21 пациент, из них 11 (52,4%) мужчин и 10 (47,6%) женщин. Средний возраст составил 58,6 года. Нозологические формы представлены идиопатическим остеоартрозом тазобедренного сустава (коксартрозом) и асептическим некрозом головки бедренной кости.

Критерии включения: соответствие пациента протоколу исследования, постоянное проживание (5 и более 5 лет) в Забайкальском крае и Республике Бурятия, наличие информированного согласия на проведение исследования и обработку полученных данных.

Критерии исключения: отказ пациента от исследования, наличие вторичного артроза тазобедренного сустава на фоне системных заболеваний (ревматоидный артрит, подагра, псориаз, анкилозирующий спондилоартрит и др.), наличие диспластического и посттравматического коксартроза.

Исследование проводили в соответствии с принципами биомедицинской этики. От каждого пациента получено информированное добровольное согласие. Исследуемые не принимали в течение трех месяцев до операции фармацевтические минеральные комплексы и биологически активные добавки.

Костную ткань забирали из проксимального отдела бедренной кости в области перехода в диафизарную часть (калькарная зона). Забор осуществляли коробчатым долотом. Костно-хрящевые пробы забирали из первой фрезы при обработке ацетабулярной впадины. Проводили пробоподготовку биоптатов. После отбора пробы хранили при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ в холодильнике. Далее из проб биоптатов, после высушивания в сушильном шкафу при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3 ч, формировали навески массой $0,100\pm 0,010$ г (аналитические

весы «ХВ 120А Precisa»). Пробы помещали в кварцевые стаканчики и подвергали мокрому озолению в 1,0 мл концентрированной азотной кислоты, в термостате при $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, до полного растворения пробы. Растворенный образец количественно переносили в мерную полипропиленовую пробирку, трехкратно смывая со стенок стаканчика раствор, и доводили деионизованной водой до 10,0 мл. Далее 500,0 мкл раствора пробы помещали в пробирку типа Eppendorf, приливали 50,0 мкл стандарта, после этого раствор наносили на кварцевый прободержатель. Определение содержания химических элементов (титана (Ti), хрома (Cr), марганца (Mn), железа (Fe), кобальта (Co), меди (Cu), цинка (Zn), мышьяка (As), брома (Br), рубидия (Rb), стронция (Sr), свинца (Pb)) проводили рентгенофлуоресцентным методом полного внешнего отражения на спектрометре S2 Picofox (Bruker Nano GmbH, Германия). Концентрацию элементов рассчитывали методом внутреннего стандарта, в качестве которого использовался стандартный образец соли германия, разбавленный деионизованной водой ($\Omega = 18,2$ МОм) с концентрацией $2,50\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. Для каждой пробы выполняли трехкратное измерение аналитического сигнала.

Статистическую обработку проводили с использованием программ «STATISTICA 13.0» и MS EXCEL. Вычисляли среднее арифметическое значение (M), среднеквадратическое отклонение (σ), медиану (Me), первый и третий квартили (Q_1 – Q_3) и коэффициент вариации (Cv). Полученные данные сравнивали с количеством микроэлементов в сухой костной ткани (Дериглазова, Рихванов, 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлено, что в исследуемых образцах среднее содержание титана, хрома, марганца, железа, кобальта, меди, цинка, брома, стронция и свинца меньше, чем в сухой костной ткани. Наибольшие отличия зафиксированы для таких элементов, как Cr (в 4,9 раза), Br и Pb (в 3,4 раза). Содержание Ti, Fe, Zn, Sr в сухой костной ткани в 2–2,8 раза больше, чем в исследуемых образцах, при этом практически одинаковыми были показатели для As и Rb, незначительно отличалось содержание Mn и Cu. Среднее количество Co в костной ткани обследованных пациентов оказалось в 4,2 раза больше, чем в сухой костной ткани (табл. 1).

Таблица 1. **Содержание микроэлементов в сухой костной ткани пациентов, перенёвших эндопротезирование бедренного сустава и данные по их среднему содержанию в сухой костной ткани (Дериглазова, Рихванов, 2020)**

Элемент	Содержание, мг/кг							Сv, %
	Среднее	M±σ	Me	Min	Max	Q1	Q3	
Ti	5,2	1,86±0,24	1,19	0,16	6,01	0,53	2,60	92,5
Cr	5,6	1,15±0,06	1,03	0,38	2,96	0,74	1,47	46,6
Mn	9,6	8,00±0,75	6,02	2,48	20,00	3,35	11,98	65,3
Fe	770	359,14±19,55	311,33	155,09	850,34	238,13	477,12	45,6
Co	0,11	0,47±0,09	0,24	0,07	1,43	0,15	0,75	96,3
Cu	4,0	3,50±0,18	3,25	1,20	9,02	2,50	3,98	43,3
Zn	280	107,37±7,45	88,51	32,50	296,61	64,70	126,62	58,0
As	0,75	0,77±0,05	0,66	0,29	1,70	0,51	0,98	46,8
Br	2,6	0,76±0,05	0,71	0,12	1,56	0,52	0,95	49,9
Rb	0,24	0,23±0,01	0,22	0,10	0,51	0,16	0,28	45,1
Sr	8,5	3,70±0,29	3,17	1,09	12,30	1,79	4,65	66,6
Pb	5,7	1,66±0,14	1,35	0,40	4,02	0,81	2,44	62,8

Сравнение полученных данных по среднему содержанию микроэлементов в костной ткани с литературными данными (Дериглазова, Рихванов, 2020) не выявило значимых отличий по критерию Манна–Уитни ($U=55$, $p=0,34$).

В связи с высокой вариабельностью значений концентрации микроэлементов более объективной является величина медианы, однако выявленные отличия от среднего содержания в сухой костной ткани имели те же тенденции. Сравнение с другими экспериментальными данными выявило большее содержание в исследуемых пробах Cr (0,005–0,015 мг/кг), тогда как количество Zn было в пределах нормы (77–180 мг/кг) (Герк, Голованова, 2015). Уровень свинца в головке и шейке пациентов обоих полов со средним возрастом 60–65 лет изучен в работе, где представлена обширная выборка по Польше и Китаю (Ciosek et al., 2021) и составил от 0,85 до 15,11 мг/кг соответственно. Сопоставимыми с полученными данными отмечались показатели жителей воеводства «Великая Польша» (Польша) – 0,86–1,57 мг/кг (головка бедренной кости) и 0,85–1,41 мг/кг (шейка) (Ciosek et al., 2021). В Верхней Силезии (Польша) количество свинца в костной ткани было кратно больше – 2,76–15,11 мг/кг, аналогичные показатели отмечались для о. Тайвань – 6,76–7,10 мг/кг (Ciosek et al., 2021). Наиболее близкие значения полученных данных по накоплению свинца соотносятся с его количеством в губчатой кости бедренной головки жителей различных регионов Польши и г. Шанхая (Китай)

(Roczniak et al., 2017; Ciosek et al., 2021). Содержание свинца в кортикальном слое было кратно большим (Дериглазова, Рихванов, 2020), иногда на порядок (Ciosek et al., 2021).

Географическими особенностями региона исследуемой группы пациентов является большая площадь территорий с низкой плотностью населения, наличие множества разрабатываемых месторождений полезных ископаемых, в том числе открытым способом (Михайлова и др., 2019), высокий уровень инсоляции. Пищевые стереотипы региона – более высокий процент животного белка и относительно низкий уровень потребления морских продуктов, а также фруктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены различия в микроэлементном статусе костной ткани исследуемой группы пациентов по сравнению с референсными значениями для усредненной сухой костной ткани. Наиболее значительное снижение содержания в костной ткани исследуемых пациентов зафиксировано по микроэлементам – Cr, Br, Pb, Ti, Fe, Zn и Sr. Для Co выявлена противоположная динамика – его средняя концентрация в костной ткани пациентов в 4,2 раза превысила референсный уровень, что может указывать на специфические метаболические нарушения у пожилых пациентов.

Статистический анализ по критерию Манна–Уитни не выявил значимых отличий в сравнении с данными литературных источников, что подчерки-

вает высокую вариабельность микроэлементного состава и важность учета региональных, возрастных и патологических особенностей. Сравнительный анализ с данными других исследований показал, что содержание токсичного свинца в костной

ткани пациентов из Забайкальского края (0,40–4,02 мг/кг) соответствует уровням, характерным для регионов с относительно благоприятной экологической обстановкой, и значительно ниже, чем в промышленно развитых регионах.

ЛИТЕРАТУРА

- Герк С.А., Голованова О.А. Элементный состав костной ткани человека в норме и при патологии. Вестник Омского университета. 2015; 78(4): 39–44.
- Дериглазова М.А., Рихванов Л.П. Поведение элементов при высокотемпературном озолении костной ткани. Микроэлементы в медицине. 2020; 21(1): 55–64. DOI: 10.19112/2413-6174-2020-21-1-55-63.
- Ихалайнен Е.С., Гайворонский И.В., Хоминец В.В., Семенов А.А., Фандеева О.М. Сравнительная характеристика химического состава костной ткани мышечков бедренной кости в норме и при деформирующем артрозе. Вестник российской военно-медицинской академии. 2018; 62(2): 177–181.
- Конев В.П., Московский С.Н., Шестель И.Л., Шишкина Ю.О., Коршунов А.С. Исследование минерального компонента и органического матрикса костной ткани с использованием методов атомно-силовой микроскопии. Судебная медицина. 2018; 1: 22–25.
- Михайлова Л.А., Бондаревич Е.А., Коцюржинская Н.Н., Соловьёва Н.В., Самойленко Г.Ю., Лескова О.А., Нимаева Б.В. Элементный состав волос детей как индикатор техногенно изменённых территорий Восточного Забайкалья. Экология человека. 2025; 32(8): 585–597. DOI: 10.17816/humeco688310.
- Михайлова Л.А., Солодихина М.А., Алексеева О.Г. и др. Гигиеническая оценка содержания химических веществ в почве горнопромышленных районов Забайкальского края. Гигиена и санитария. 2019; 98(4): 400–410. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-4-400-410.
- Тармаева И.Ю., Скальный А.В., Богданова О.Г., Грабеклис А.Р., Белых А.И. Элементный статус взрослого трудоспособного населения Республики Бурятия. Мед. труда и промышленная экология. 2019; 59(5): 308–313 DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-5-308-313.
- Ciosek Ż., Kot K., Kosik-Bogacka D., Łanocha-Arendarczyk N., Rotter I. The Effects of Calcium, Magnesium, Phosphorus, Fluoride, and Lead on Bone Tissue. Biomolecules. 2021; 11(4): 506. DOI: 10.3390/biom11040506.
- Roczniak W., Brodziak-Dopierała B., Cipora E., Mitko K., Jakóbiak-Kolon A., Konieczny M., Babuška-Roczniak M. The Content of Structural and Trace Elements in the Knee Joint Tissues. Int J. Environ. Res. Public Health. 2017; 14: 1441. DOI: 10.3390/ijerph14121441.
- Zaichick V. Chemical Elements of Human Bone Tissue Investigated by Nuclear Analytical and Related Methods. Biological Trace Element Research, 2013; 153: 84–99. DOI: 10.1007/s12011-013-9661-4.

Информация об авторах:

Е.А. Бондаревич – к.б.н., доцент, доцент кафедры химии и биохимии
ORCID: 0000-0002-0032-3155; SPIN: 2664-0626

В.В. Доржиев – к.м.н., доцент, доцент кафедры травматологии и ортопедии
ORCID: 0000-0002-3324-658X; SPIN: 8223-4195

В.С. Шитин – врач-ординатор кафедры травматологии и ортопедии

А.Ф. Старицын – ординатор кафедры травматологии и ортопедии

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ANALYSIS OF MICROELEMENT COMPOSITION OF BONE TISSUE IN ELDERLY PATIENTS WITH HIP JOINT PATHOLOGY

E.A. Bondarevich, V.V. Dordzheev, V.S. Shitin, A.F. Staritsyn

Chita State Medical Academy of the Russian Ministry of Health;
39a Gorky St., Chita, 672000, Russian Federation

ABSTRACT. The aim of this study was to determine the microelement composition of bone tissue in patients with severe hip pathology living in the Trans-Baikal Territory.

Materials and Methods. Twenty-one patients were examined, including 11 (52.4%) men and 10 (47.6%) women who had undergone total hip arthroplasty. The average age of the patients was 58.6 years. The nosological entities represented idiopathic coxarthrosis and aseptic necrosis of the femoral head. Microelement content was determined using total external reflectance X-ray fluorescence analysis.

Results. The study revealed a significant imbalance in the microelement composition of bone tissue in patients with idiopathic coxarthrosis and aseptic necrosis. Mean levels of titanium (Ti), chromium (Cr), manganese (Mn), iron

(Fe), copper (Cu), zinc (Zn), bromine (Br), strontium (Sr), and lead (Pb) were below the reference values for average dry bone tissue. The most significant decreases (2-5 times) were observed for Cr, Br, Pb, Ti, Fe, Zn, and Sr. In contrast, cobalt (Co) levels were 4.2 times higher than the reference value. Statistical analysis using the Mann-Whitney U test revealed no significant differences with one literature source ($U = 55$, $p = 0.34$), indicating high variability in microelement composition.

Conclusions. The study identified specific microelement imbalances in bone tissue in patients who underwent hip arthroplasty. The identified deficiency of essential elements (Zn, Sr, Cu) and pathological accumulation of Co may play a role in the pathogenesis of degenerative joint changes and should be considered when developing comprehensive rehabilitation and preventive measures for this category of patients.

KEYWORDS: bone tissue microelement composition, X-ray fluorescence analysis, hip joint.

For citation: Bondarevich E.A., Dordzheev V.V., Shitin V.S., Staritsyn A.F. Analysis of microelement composition of bone tissue in elderly patients with hip joint pathology. *Trace elements in medicine*. 2026;27(1):52–56. DOI: 10.19112/2413-6174-2026-27-1-52-56

REFERENCES

Gerk S.A., Golovanova O.A. Trace element composition of human bone tissue in normal and pathological condition. *Herald of Omsk University*. 2015; 75(4): 39–49 (in Russ.).

Deriglazova M.A., Rikhvanov L.P. Behavior of elements during high-temperature bone combustion. *Trace Elements in Medicine*. 2020; 21(1): 55–64. DOI: 10.19112/2413-6174-2020-21-1-55-63 (in Russ.).

Ihalainen E.S., Gayvoronsky I.V., Khominets V.V., Semenov A.A., Fandeeva O.M. Comparative chemical composition analysis of femoral condyles bone tissue in health and in deforming arthrosis. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2018; 62(2): 177–181 (in Russ.).

Konev V.P., Moscovskiy S.N., Shestel I.L., Shishkina Yu.O., Korshunov A.S. Investigation of the mineral component and organic matrix of bone tissue using methods of atomic-power microscopy. *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2018; 4(1): 22–25 (in Russ.).

Mikhailova L.A., Bondarevich E.A., Kotsurzhinskaya N.N., Solovjeva N.V., Samoilenko G.Yu., Leskova O.A., Nimaeva B.V. Elemental Composition of Children's Hair as an Indicator of Technogenically Altered Territories in Eastern Transbaikalia. *Human Ecology*. 2025; 32(8): 585–597. DOI: 10.17816/humeco688310 (in Russ.).

Mikhailova L.A., Solodukhina M.A., Alekseeva O.G., Burlaka N.M., Lapa S.E. Hygienic assessment of the content of chemicals in the soil of mining areas of the Trans-Baikal region. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(4): 400–410. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-4-400-410 (in Russ.).

Tarmaeva I.Yu., Skalny A.V., Bogdanova O.G., Grabeklis A.R., Belykh A.I. Elemental status of the adult able-bodied population of the Republic of Buryatia. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2019; 5: 308–313. (In Russ.). DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-5-308-313 (in Russ.).

Ciosek Ż., Kot K., Kosik-Bogaćka D., Łanocha-Arendarczyk N., Rotter I. The Effects of Calcium, Magnesium, Phosphorus, Fluoride, and Lead on Bone Tissue. *Biomolecules*. 2021; 11(4): 506. DOI: 10.3390/biom11040506.

Rocznik W., Brodziak-Dopierała B., Cipora E., Mitko K., Jakóbiak-Kolon A., Konieczny M., Babuška-Rocznik M. The Content of Structural and Trace Elements in the Knee Joint Tissues. *Int J. Environ. Res. Public Health*. 2017; 14: 1441. DOI: 10.3390/ijerph14121441.

Zaichick V. Chemical Elements of Human Bone Tissue Investigated by Nuclear Analytical and Related Methods. *Biological Trace Element Research*. 2013. 153: 84–99. DOI: 10.1007/s12011-013-9661-4.

Information about the authors:

E.A. Bondarevich – Ph.D. (Biol.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Chemistry and Biochemistry;
ORCID: 0000-0002-0032-3155; SPIN: 2664-0626

V.V. Dordzheev – Ph.D. (Med.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics;
ORCID: 0000-0002-3324-658X; SPIN: 8223-4195

V.S. Shitin – Resident Physician of the Department of Traumatology and Orthopedics

A.F. Staritsyn – Resident of the Department of Traumatology and Orthopedics

Conflict of interest

The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Поступила 30 октября 2025 года
Принята к публикации 25 февраля 2026 года

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОБЛЕМНЫЕ СТАТЬИ – TOPICAL PAPERS

Рисник Д.В., Коденцова В.М.

ЙОДДЕФИЦИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ В РОССИИ:

ПРОБЛЕМА ПРЕДОТВРАТИМА, НО НЕ РЕШЕНА..... 3

Risnik D.V., Kodentsova V.M.

IODINE DEFICIENCY IN RUSSIA: A PREVENTABLE,

BUT NOT SOLVED, PROBLEM..... 10

Hussain M.B., Zaidi K., Lapin I.I., Lyapunovsky D.M.,

Skalny A.V., Bezrukov E.A., Torshin V.I., Severin A.E.

THE ROLE OF ESSENTIAL AND TOXIC ELEMENTS IN THE DEVELOPMENT
OF PROSTATE CANCER: COMPREHENSIVE ANALYSIS AND PROSPECTS.

REPORT 1. BIOLOGICAL ASPECTS..... 13

Хуссейн М.Б., Заиди К., Лапин И.И., Ляпуновский Д.М.,

Скальный А.В., Безруков Е.А., Торшин В.И., Северин А.Е.

РОЛЬ ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ И ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В РАЗВИТИИ РАКА ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ:

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ.

СООБЩЕНИЕ 1. БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ..... 22

Камалян А.В., Баринов Е.Х.

СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ
МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ТКАНЕЙ ЗУБА

ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ..... 24

Kamalyan A.V., Barinov E.H.

FORENSIC SIGNIFICANCE OF TRACE ELEMENT COMPOSITION

OF DENTAL TISSUES IN PERSONAL IDENTIFICATION 29

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ – ORIGINAL PAPERS

Мандров С.И., Жданова Л.А., Шишова А.В.,

Ларюшкина Р.М., Глазова Т.Г., Семенова Д.А.

СУТОЧНЫЕ РИТМЫ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ

В КОНДЕНСАТЕ ВЫДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА

ПРИ РЕЦИДИВИРУЮЩЕМ БРОНХИТЕ У ДЕТЕЙ 31

Mandrov S.I., Zhdanova L.A., Shishova A.V.,

Laryushkina R.M., Glazova T.G., Semenova D.A.

CIRCADIAN RHYTHMS OF CALCIUM AND MAGNESIUM

IN EXHALED AIR CONDENSATE

IN RECURRENT BRONCHITIS IN CHILDREN..... 37

Белик О.С. ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ЭЯКУЛЯТА, ВОЛОС И СЫВОРОТКИ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ИДИОПАТИЧЕСКОГО МУЖСКОГО БЕСПЛОДИЯ У ЖИТЕЛЕЙ СЕВЕРНОГО РЕГИОНА (ХМАО-ЮГРА)	40
<i>Belik O.S.</i> PROGNOSTIC VALUE OF TRACE ELEMENT PROFILES IN EJACULATE, HAIR, AND BLOOD SERUM FOR THE DIAGNOSIS OF IDIOPATHIC MALE INFERTILITY AMONG RESIDENTS OF A NORTHERN REGION (KhMAO-YUGRA)	49
Бондаревич Е.А., Доржиев В.В., Шитин В.С., Старицын А.Ф. АНАЛИЗ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА КОСТНОЙ ТКАНИ У ПОЖИЛЫХ ПАЦИЕНТОВ С ПАТОЛОГИЕЙ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА	52
<i>Bondarevich E.A., Dordzheev V.V., Shitin V.S., Staritsyn A.F.</i> ANALYSIS OF MICROELEMENT COMPOSITION OF BONE TISSUE IN ELDERLY PATIENTS WITH HIP JOINT PATHOLOGY	55