

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2022-16-67-82>

МЫШЬЯК И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Гладышев В.Б., Мазуркин П.И.

*Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства
имени А.Н. Костякова, Россия, Москва*

Ключевые слова: мышьяк, арсениты, арсенаты, интоксикация, почва, растения, животные.

Аннотация. Мышьяк (As) – один из самых опасных химических элементов, при этом загрязнение окружающей среды его соединениями становится частым явлением. В настоящей статье представлены обобщенные данные последних лет о взаимодействии элемента в окружающей среде, его возможной эссенциальной роли в живых организмах и токсичности соединений для растений и животных. Представлены основные механизмы повреждающего действия мышьяка и частные случаи воздействия на организм растений, наземных и водных животных. Также приводятся способы ремедиации загрязненных почв, защиты растений и животных от отравления соединениями мышьяка.

ARSENIC AND ITS IMPACT ON LIVING ORGANISMS

Gladyshev V.B., Mazurkin P.I.

*Institute of Amelioration, water management and construction
named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russia*

Keywords: arsenic, arsenites, arsenates, intoxication, soil, plants, animals.

Abstract. Arsenic (As) is one of the most dangerous chemical elements, and environmental pollution with its compounds becomes a frequent occurrence. This article presents generalized data of recent years on the interaction of the element in the environment, its possible essential role in living organisms, and the toxicity of compounds to plants and animals. The main mechanisms of the damaging effect of arsenic and particular cases of the impact on the plant organisms, terrestrial and aquatic animals are presented. Methods for remediation of contaminated soils, protection of plants and animals from poisoning by arsenic compounds are also given.

Введение

Мышьяк (As) – элемент 15 группы или главной подгруппы V группы по старой классификации с атомным номером 33 и атомной массой 75, неметалл. Название происходит от греческого слова *arsenikon*, обозначающего желтый пигмент, а в русском языке – от слова *мышь*, что связано с использованием содержащих мышьяк средств в борьбе с мышами и крысами. Открытие элемента принадлежит Альберту Великому и датируется XIII веком. [1]. По А.П. Виноградову кларк мышьяка в почвах мира равен 5,0 мг/кг. В некоторых типах незагрязненных почв содержание мышьяка естественно повышено – 10,0-12,0 мг/кг. В земной коре элемент содержится в незначительном количестве – порядка 0,0001%, но он широко присутствует в природе и ассоциируется рудами меди, свинца и месторождениями золота. Элементарная форма As в естественной среде встречается редко. Наиболее часто мышьяк бывает представлен неорганическими арсенатами As(V) (H_2AsO_4^- и HAsO_4^{2-}) в водной и воздушной средах и арсенитами As (III)

(H_3AsO_3^0 и H_2AsO_3^-), характерных для сред без доступа кислорода. As (V) прочнее связывается сорбентами, менее подвижен и биодоступен, чем As (III), его токсичность в 2-3 раза ниже [2, 3]. Мышьяк активно взаимодействует с элементами 16 группы: серой, селеном и теллуrom, а также многими другими элементами. Промышленностью востребованы арсениды с алюминия, индия и галлия [4].

Мышьяк нашел применение в хозяйственной деятельности человека. Его используют в производстве различных сплавов, аккумуляторов, полупроводников, красителей, текстильной и кожевенной промышленности, производстве стекла. Высокоочищенный мышьяк применяется в микро- и оптоэлектронике, гелиоэнергетике, голографии и лазерной технике. В сельском хозяйстве применяются триоксид мышьяка и двузамещенные арсениды натрия и кальция в качестве пестицидов. Также истории известно длительное применение соединений элемента в медицинских целях. Для этих целей мышьяк получают из сульфидных руд, среди которых арсенопирит, аурипигмент, реальгар, в качестве альтернативного источника рассматриваются отходы цветной металлургии, содержание As в которых составляет 0,5-5% [1, 4-6].

Все же основными источниками техногенного присутствия As в окружающей среде считаются содержащие элемент отвалы руд – опасные для экологии техногеохимические аномалии, приводящие к формированию биогеохимических провинций. В то же время для территорий ряда стран Азии свойственно загрязнение природным мышьяком. Проявление токсического действия мышьяка выражено в почвах, богатых фосфатами, а присутствие большого количества органики в среде делает As более биодоступным [3].

Материалы и методы

В целях написания обзорной статьи собраны и изучены наиболее актуальные материалы российский и зарубежных исследователей, размещенные в научных периодических изданиях, монографиях, книгах, сборниках трудов научных симпозиумов, семинаров, конференций, патенты и диссертационные работы. Предпочтительным было использование научных работ, размещенных в рецензируемых изданиях и индексируемых в ведущих наукометрических базах.

Результаты и обсуждение

Механизмы токсического действия мышьяка

Преимущественное повреждающее действие мышьяка заключается в способности блокировать сульфгидрильные (или тиоловые, SH-) группы белковых молекул, в связи с этим его относят к так называемым тиоловым ядам. Заблокированные SH-группы приводят к нарушению функций белков и потере активности многих ферментов. As также связывает карбоксильные, аминные и другие группы. Происходят нарушения передачи нервного импульса, мышечных сокращений, изменяется проницаемость мембран клеток. Воздействие соединений мышьяка на митохондриальные ферменты

обуславливает нарушение клеточного дыхания [7]. Менее токсичный пятивалентный As в организме способен восстанавливаться в более токсичный трехвалентный. Арсенаты проявляют конкурентные взаимоотношения с фосфатом, тормозя тем самым окислительное фосфорилирование. Трехвалентный мышьяк сокращает синтез АТФ, нарушает пируватный глюконеогенез: синтез щавелевоуксусной кислоты из пирувата. Образование АТФ сокращается и под воздействием пятивалентного мышьяка: он вовлекается в реакции гликолиза с образованием 1-арсено-3-фосфоглицерата вместо 3-фосфоглицерата, получаемое соединение не может принимать участие в образовании АТФ.

Помимо антагонизма с фосфором, мышьяк проявляет конкурентные взаимоотношения с серой и селеном, витаминами А, С и Е. В случае недостатка селена в организме As начинает усиленно накапливаться, что усугубляет селенодефицит. При избытке мышьяка снижается усвоение цинка [1].

Серьезный дисбаланс окислительно-восстановительных процессов при интоксикации As возникает из-за снижения уровня глутатиона, блокирования сульфгидрильных групп каталазы и сопутствующем увеличении количества активных форм кислорода. Образование глутатиона сокращается из-за потери активности глутатионсинтетазы и глутатионредуктазы. Как правило, в тканях падает активность супероксиддисмутазы. Арсениты в присутствии воды и молекулярного кислорода могут вовлекаться в продукцию перекиси водорода [8-10].

Многолетний контакт с соединениями As обуславливает хронические неврологические нарушения: снижение слуха и периферическую невропатию. Из-за угнетения функций костного мозга развиваются эозинофилия, апластическая анемия, тромбоцитопения или панцитопения. Обнаруживаются разнообразные патологии печени: цирроз, первичная карцинома, нецирротическая портальная гипертензия [11]. Хроническая интоксикация приводит к росту числа репродуктивных нарушений и оказывает тератогенное действие [12, 13].

Воздействие мышьяка на растения

Практически всегда наличие мышьяка устанавливается при анализе минерального состава образцов растений, в том числе растущих на незагрязненных территориях. Фоновый уровень элемента в них равен 0,005-1,5 мг/кг сухой массы. До сих пор биологическая роль As в растительном организме вызывает вопросы, хотя не подлежит сомнению токсичность элемента при высоких концентрациях в органах растений. При этом различные виды демонстрируют толерантность к соединениям мышьяка в очень широком диапазоне, в зависимости от видовой принадлежности сильно варьируется и степень аккумуляции элемента. Так, элемент практически не накапливается надземными органами винограда на лессовидных суглинках с уровнем мышьяка 12,5 мг/кг [14]. Некоторыми исследователями отмечается, что небольшие дозы мышьяка способствуют ускорению роста и повышению

урожайности, лучшему усвоению из почвы фосфора и улучшению жизнедеятельности почвенных микроорганизмов [15]. В качестве примера можно привести стимулирование развитие топинамбура (*Heliantus tuberosis*) в почвах с содержанием мышьяка в интервале от 2,0 до 8,0 мг/кг [16].

Поскольку преимущественно мышьяк проникает в растения из почвы, самые высокие его концентрации наблюдаются в корневой системе. Влияние переносимой атмосферным воздухом пыли сильно зависит от характеристик листовой пластины, сильное накопление токсикантов происходит у растений, имеющих широкие ворсистые и шероховатые листья. Наименьшие количества мышьяка содержатся в цветках, плодах и зерне. Чаще всего отрицательное воздействие загрязнения окружающей среды мышьяком отмечается в растительных сообществах, расположенных рядом с отвалами горнорудных предприятий и на загрязняемых осадками сточных и дренажных вод почвах, агроценозах полей, обрабатываемых мышьяксодержащими пестицидами. Угнетение метаболических процессов и повреждение тканей начинается при превышении дозы 5-20 мг/кг [15]. Накопление As отражается на темпе роста растения, скорости смены фенологических фаз, листья приобретают фиолетовую окраску, увядают. Урожайность сельскохозяйственных культур сильно снижается. В природных биогеоценозах снижается плотность популяции и видовое разнообразие.

Крайне негативное влияние повышенная концентрация As оказывает на фотосинтез: в растительном организме происходит повреждение хлоропластов и кратное снижение содержание хлорофилла. М. Rostami и Н. Abbaspour докладывают о трехкратном уменьшении его количества в побегах базилика *Ocimum basilicum* L. после 3-разового полива раствором мышьяка в концентрации 300 мкмоль/л в виде арсената [17].

Воздействие мышьяка на животных

В организм животных соединения мышьяка попадают с кормами, аэрогенным путем и с загрязненной водой. Причиной отравления выступает и низкая культура использования ядов в борьбе с грызунами и вредителями. Опасные концентрации мышьяка могут присутствовать в минеральных добавках, применяемых в животноводстве: цеолитах и бентонитах [18, 19]. As быстро абсорбируется из пищеварительного тракта и легких и переносится с током крови в большинство тканей, задерживаясь в паренхиматозных органах. В организме мышьяк концентрируется в основном в печени, почках, легких и кожном покрове. Меньшие концентрации наблюдаются в костях и мышцах, а при хронической интоксикации отмечается накопление As в волосе и ногтях, перьях птиц, чешуе рыб [7, 20]. Не смотря на ядовитость соединений мышьяка для животных, в ветеринарии еще недавно использовали мышьяксодержащие препараты для лечения пневмонии и заболеваний желудочно-кишечного тракта: осарсол, новарсенол, миоарсенол [21]. Стоит упомянуть, что добавление в рацион птиц 5,0-8,0 мг/кг As повышает яйценоскость, те же количества улучшают приросты молодняка свиней и скота. Низкие дозы мышьяка благоприятствуют усвоению азота и фосфора

корма [15]. У человека возможен дефицит мышьяка при его употреблении 1 мкг в день и менее [11].

Острое отравление мышьяком у человека проявляется при пероральном употреблении 5-50 мг мышьяка, по другим сведениям – дозы от 70 мг, а летальная доза составляет 50-340 мг [1, 7]. При острой интоксикации происходит внутрисосудистый гемолиз, развивается острая недостаточность органов-мишеней – печени и почек. Со стороны пищеварительной системы наблюдается рвота и диарея. Угнетается работа центральной нервной системы, в течение нескольких часов развивается слабость, парез, тонические судороги, отек мозга, потеря сознания и паралич сосудодвигательных дыхательных центров [22, 23].

Продолжительное поступление As с пищей или водой отражается на состоянии кожного покрова, отмечаются очаги поражений с гиперпигментацией, гиперкератозом или, напротив, утратой пигмента. Возможны зуд, дерматит и изъязвления кожи, также значительно возрастает риск развития новообразований и низкодифференцированного рака кожи. Злокачественные образования часто поражают печень, почки, мочевой пузырь и легкие. Вторичными проявлениями арсеникальных кератозов являются базальноклеточная базалиома, сквамозноклеточная карцинома (или плоскоклеточный рак) и болезнь Боуэна [11]. Международным агентством по изучению рака (IARC) мышьяк признан канцерогеном 1 класса.

У домашних кур при остром отравлении становится заметен цианоз гребня и сережек. Как и у других животных развивается общая слабость, жажда, глотание затрудняется. При пальпации зоба и пищевода птицы испытывают болевые ощущения, температура тела снижается. При сильной интоксикации птицы впадают в коматозное состояние и погибают. Хроническое отравление сельскохозяйственных птиц приводит к снижению массы тела и расстройству пищеварения, помет имеет беловатую окраску, водянистую консистенцию, возможны примеси крови [24, 25].

Клинические признаки отравления скота бывают расплывчаты, острые случаи характеризуются неблагоприятным прогнозом. Проведенный F.R. Bertin и соавт. анализ различных случаев интоксикации установил, что самыми распространенными признаками являются внезапная смерть – 68% случаев, диарея – 33%, атаксия – 29%, обезвоживание – 22%, респираторные нарушения – 4%, снижение молочной продуктивности – 3%, повышенное слюноотделение – 1%. Среди изменений биохимического состава крови крупного рогатого скота фиксируется азотемия, увеличение активности АсАТ, креатининкиназы, щелочной фосфатазы, гаммаглутамилтрансферазы, гипербилирубинемия, гипокальцемия. Гематурия была обнаружена во всех пробах при анализе мочи [26].

M.A. Gonçalves и соавт. приводят пример отравления скота метиларсонатом натрия – органическим соединением As, используемым в качестве гербицида. В данном случае у животных после пребывания на загрязненном пастбище развивались уже упомянутые симптомы: диарея и

обезвоживание. У погибших животных высокая концентрация мышьяка $>1,5\text{мг/кг}$ была выявлена в печени, почках, скелетных мышцах и моче. Обнаруживались язвенные поражения слизистой оболочки предсердий, фибринозный некроз сосудов с мультифокальным тромбозом [27].

Во время осмотра туш животных, вынуждено забитых из-за отравления, отмечается плохая свертываемость крови, место зареза слабо инфильтровано кровью. Мясо темно-красного цвета, мышцы кровянистые, из-за ухудшения обескровливания туши жировая ткань становится розового цвета, выражено наполнение кровью сосудов брюшины и плевры, паренхиматозных органов. Печень полнокровна и увеличена, в ней наблюдаются дистрофические изменения, разрушение паренхимы. При гистологическом исследовании выявляется жировое перерождение гепатоцитов, активнее всего протекающее в центре долек, зернистая дистрофия протоплазмы клеток и лизис ядер. Запасы гликогена минимальны. Интоксикация As приводит к увеличению почек и их застойной гиперемии, развивается некроз почечных канальцев и гнойный пиелонефрит. В слизистых желудка и кишечника заметно воспаление, отечность и присутствие слизи. Изменения в желудочно-кишечном тракте павших животных похожи на поражения при сальмонеллезе, кишечная жидкость темная и гнилостная, видны различной степени эрозии и подслизистые отеки пищевода, желудка (и преджелудков у жвачных), тощей кишки и ректальных складок. Поперечная исчерченность мышц миокарда отсутствует, легкие отечны [21, 23, 26].

Отравление соединениями мышьяка свиней проявляется грубеющим волосяным покровом, диареей с примесью слизи. На кожном покрове, особенно у белых животных, становится заметна гиперемия, развивается повышенная чувствительность: животные визжат и проявляют беспокойство при попытках взять на руки или прикосновениях. Движения становятся плохо скоординированными, что свидетельствует о повреждении нервной системы, свиньи плохо удерживают равновесие, шатаются при попытке изменить направление движения. Сильная или продолжительная интоксикация сопровождается парезом. Животные также начинают испытывать трудности при приеме корма и воды. Когда поступление As продолжается длительное время в небольших количествах молодые свиньи демонстрируют сниженное потребление кормов, снижение среднесуточных привесов и живой массы в итоге [28]. Эти проявления наблюдаются как при употреблении арсенитов, так и арсенатов и других соединений, что подтверждается в опытных условиях с участием лабораторных животных. Кроме того, в экспериментальных условиях часто отмечают повреждения репродуктивной системы, в частности снижение массы тестикулярной ткани у самцов [29-31].

Наблюдаемое по всему миру загрязнение мышьяком вод представляет значительную угрозу для гидробионтов. Концентрация As в количестве 150мкг/л достоверно снижает живую массу рыб, вызывает дисбаланс перекисного окисления липидов и активности ферментов антиоксидантной защиты, а значит, развитие оксидативного стресса и затрагивает экспрессию генов,

регулирующих пролиферацию и апоптоз, в результате апоптоз клеток ускоряется [32]. Острое отравление рыб мышьяком происходит крайне редко, хотя описано действие его высоких концентраций в водной среде. Так, он действует прижигающе на кожу и жабры, рыбы становятся угнетенными, гибели предшествует сильное возбуждение и судороги. Патоморфологические исследования мертвой рыбы выявляют дистрофические изменения дыхательного аппарата, некроз тканей печени и почек. Отмечается, что зоопланктон более восприимчив к повышению концентрации мышьяка [20].

Мышьяк растительных кормов легко переходит в мышечную ткань животных. Е.И. Алексеева приводит коэффициент перехода мышьяка в мясо (говядина), равный 71,4% [33]. Термическая обработка продуктов животноводства плохо снижает содержание мышьяка, и сокращение его содержания в обработанных продуктах составляет не более 30%. В связи с чем использование в пищу мясной и молочной продукции животных, отравившихся мышьяком или имевших хроническую интоксикацию, не должно допускаться. Максимально допустимые уровни, регулируемые СанПиНом, в продуктах питания находятся в границах 0,1-1,0 мг/кг сырого продукта, в моллюсках и ракообразных допустимый уровень несколько выше – 5,0 мг/кг [21].

Детоксикация и профилактические меры

Доступным и безопасным методом обезвреживания поллютантов в почвах считается использование различных сорбентов. В этих целях хорошо подходят рыхлые пористые материалы с высокой емкостью ионного обмена. Так, хорошие результаты демонстрирует внесение в почву бентонитов, цеолитов, карбонатного сапропеля, вермикулита, диатомита, глины и др. Л.В. Кирейчева и О.Б. Хохлова рекомендуют для связывания мышьяка в почве использовать смесь карбонатного сапропеля, цеолита и сульфата алюминия в дозе 1 кг/м² почвы. Использованные в качестве индикатора семена пшеницы в обработанной почве давали большую массу ростков, нежели в необработанной почве с содержанием As 40 мг/кг, что говорит об уменьшении перехода мышьяка в растительный организм. Также улучшить связывание мышьяка сорбентами помогает их обработка Fe³⁺, сократить токсичность мышьяка для растений – внесение фосфора [15, 34].

Для очищения загрязненных солями As почв А.С. Коновалов и соавт. предлагают использовать препарат на основе гуминовых кислот. Протекторные свойства гуминовых кислот реализуются за счет действия ван-дер-ваальсовых сил и донорно-акцепторных взаимодействий. Токсичные соединения оказываются связаны гуминовыми веществами, снижая отравляющий потенциал [35].

Экологичным и эффективным способом является снижение концентрации мышьяка в загрязненных почвах с помощью фиторемедиации, организуя посадки растений-гиперконцентраторов, аккумулирующих большие количества токсиканта. Таким образом происходит избирательный вынос токсичных элементов растениями – фитоэкстракция. Идеальными для

данной цели растения должны обладать следующими качествами: толерантность к токсиканту, быстрое наращивание большого объема биомассы, повышенное накопление элемента-поллютанта, удобство уборки для последующей переработки. Примером может служить посадка ветивера *Chrysopogon* в странах Азии [36, 37, 38]. С другой стороны, для защиты культурных растений, которые более восприимчивы к тяжелым металлам и мышьяку предлагается использовать штаммы почвенных ризосферных бактерий, например *Azotobacter* и *Bacillus*. В загрязненных почвах они переводят подвижные соединения в органические формы, труднодоступные для растения, следовательно, улучшается рост и продукция культур, и снижается содержание опасных элементов в растительных кормах и продуктах питания человека [39, 40].

В животноводстве при интоксикации используются разные виды энтеросорбентов и инъекционных препаратов, направленных на снижение токсической и метаболической нагрузки, уменьшение воспаления и скорейший вывод токсиканта из организма. Поскольку As сильно повреждает печень и почки, оправдано использование гепатопротекторов [34, 41]. В лечении острых отравлений крупного рогатого скота в качестве антидота применяется тиосульфат натрия в виде внутривенных инъекций 20-40 мг/кг и перорально 80 мг/кг. Может быть использована серосодержащая аминокислота – цистеин в количестве 200 мг/кг внутривенно каждые 8ч, ее использование помогает поддержать запас восстановленного глутатиона, тем самым уменьшая оксидативный стресс. Тиоктовая кислота также обладает свойствами детоксиканта и антиоксидантным действием, благодаря связыванию свободных радикалов), вводится животным внутривенно 50 мг/кг каждые 8ч, иногда в комбинации с димеркаптопропанолом [26].

В целях детоксикации возможно использование Унитиола в виде 5% раствора в течение нескольких дней или прерывными курсами. Хелатообразующий препарат формирует с мышьяком нетоксичные комплексы, которые затем выводятся почками. Обезвреживание всосавшегося As можно провести с помощью внутримышечных инъекций унитиола, образованные в крови и тканях комплексы также будут выведены собственной выделительной системой [42].

Дополнением лечения интоксикации сельскохозяйственных животных служат добавки витаминов-антиоксидантов А, С и Е и элементов-антагонистов мышьяка [43]. Например, дополнительное выпаивание Гидровита Е (витамина Е) в количестве 170 мл на т корма снизило накопление мышьяка у цыплят-бройлеров на 20,3% ($p < 0,01$), а при выпаивании 340 мл на т корма накопление снизилось на 25,3% [44]. Применение α -токоферола 400мг/кг живой массы совместно с аскорбиновой кислотой 200 мг/кг живой массы крысам, получавшим питьевую воду с 100 мг/кг мышьяка в течение 30 дней снизило оксидативный стресс и повысило уровень общих сульфгидрилов и восстановленного глутатиона. Показатели активности супероксиддисмутазы, каталазы, глутатионпероксидазы, глутатионредуктазы

и глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы восстановились практически до нормального уровня [45]. Обогащение селеном путем опрыскивания раствором 5 мг/л улучшило рост базилика *Ocimum basilicum* L. и снизило стрессовый эффект мышьяка, а также оказывало положительное влияние на фотосинтез за счет восстановления поврежденных хлоропластов и усиления продукции глутатионпероксидазы. Использование соединений селена является одним из лучших способов снизить оксидативный стресс, развивающийся при отравлении тяжелыми металлами и металлоидами [17, 46].

Заключение

В современном мире техногенные нагрузки часто становятся причинами изменения не в лучшую сторону состава почв, вод и атмосферного воздуха. Загрязнения затрагивают растительный покров, животных и человека. Рассмотренный в рамках данного текста мышьяк считается лишь условно эссенциальным элементом, его роль в живых системах ограничена и мало изучена, в то же время элемент проявляет сильную токсичность, а степень загрязнения им окружающей среды высока.

Изучение литературных данных позволяет утверждать, что обнаружение превышающих максимально допустимых уровень количеств элемента в источниках воды, атмосферном воздухе, кормах животных и продуктах питания человека, способных приводить к интоксикации не являются редкостью. Несоблюдение контроля за использованием соединений мышьяка приводит к острым отравлениям животных и человека. Даже при выздоровлении могут сохраняться долговременные или постоянные патологические изменения печени, выделительной и нервной систем.

В заключение важно напомнить о важности рационального использования и строго контроля применения в сельском хозяйстве, промышленности и высокотехнологичном производстве соединений мышьяка и необходимости ремедиации загрязненных территорий.

Список литературы

1. Скальный А.В., Рудаков И.А. Биоэлементы в медицине. – М.: Изд. дом «ОНИКС 21 век»: Мир, 2004. – 272 с.
2. Oremland R.S., Stolz J.F. The ecology of arsenic // Science. 2003. Vol. 300. No. 5621. P. 939-944.
3. Водяницкий Ю.Н. Хром и мышьяк в загрязненных почвах // Почвоведение. 2009. № 5. С. 551-559.
4. Гасанов А.А., Наумов А.В., Петров И.М. Россия на мировом рынке мышьяка и его соединений // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2016. № 1-2. С. 90-95.
5. Сметанин А.В., Пышкин А.С., Осипов Г.Н., Сохадзе Л.А., Смирнов М.К., Турыгин В.В., Жуков Э.Г., Потолоков В.Н., Томилов А.П., Федоров В.А. Извлечение мышьяка из промышленных отходов цветных металлов // Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 10. С. 1219-1229.

6. Самбурова М.А., Сафонов В.А. Накопление мышьяка и тяжелых металлов живыми организмами на территории техногенного образования в Челябинской области // Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине. Труды XII Международной биогеохимической школы, посвященной 175-летию со дня рождения В.В. Докучаева. Тула, 2021. С. 394-401.
7. Ebele B. Mechanisms of arsenic toxicity and carcinogenesis // African Journal of Biochemistry Research. 2009. Vol. 3. No. 5. pp. 232-237.
8. Valko M., Morris H., Cronin M.T.D. Metals, toxicity and oxidative stress // Current medicinal chemistry. 2005. Vol. 12. No. 10. P. 1161-1208.
9. Mucha S., Berezowski M., Markowska K. Mechanisms of arsenic toxicity and transport in microorganisms // Postępy Mikrobiologii-Advancements of Microbiology. 2019. Vol. 56. No. 1. P. 88-99.
10. Ермаков В.В., Сафонов В.А., Якименко В.Н. Экспресс-метод определения активности супероксиддисмутазы в крови // Доклады МОИП: Растения. Экология. Окружающая среда. 2016. Т. 62. С. 10-15.
11. Радыш И.В., Скальный А.В. Введение в медицинскую элементологию. М.: Российский университет дружбы народов, 2015. 200 с.
12. Ventsova I., Safonov V. The role of oxidative stress during pregnancy on obstetric pathology development in high-yielding dairy cows // American Journal of Animal and Veterinary Sciences. 2021. Vol. 16. No. 1. P. 7-14.
13. Quiterio-Pérez M., Gaytán-Oyarzún J.C., Gordillo-Martínez A.J., Prieto-García F. Teratogenic effect on bone tissue development in *Rattus norvegicus* Wistar strain, induced by the presence of arsenic // Dyna. 2018. No. 85(206). P. 242-249.
14. Абдушукуров Д.А., Абдусамадзода Д., Абдуллоев С.Ф., Осёнова Л.Н. Особенности поглощения микроэлементов разными сортами винограда // Доклады таджикской академии сельскохозяйственных наук. 2016. №1(47). С. 17-22.
15. Косолапов В.М., Чуйков В.А., Худякова Х.К., Косолапова В.Г. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа: Монография. Москва: ООО «Угрешская типография», 2019. – 272 с.
16. Григорьев А.А., Бородихин А.С., Руденко О.В. Оценка влияния степени загрязнения почвы тяжелыми металлами на процесс вегетации топинамбура // Современные проблемы науки и образования. 2015. №1-1.
17. Rostami M., Abbaspour H. Effect of selenium on growth and physiological traits of basil plant (*Ocimum basilicum* L.) under arsenic stress conditions // Revista de Agricultura Neotropical. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 30-37.
18. Свамбаева Е.А., Свамбаев А., Тусупбекова С.Т. Уровень загрязнения тяжелыми металлами зерно-фуража, предназначенные для кормления животных и птиц // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы V Международной конференции. 2016. С.585-587.

19. Safonov V. Assessment of heavy metals in milk produced by black-and-white Holstein cows from Moscow // *Current Research in Nutrition and Food Science*. 2020, Vol. 08. No. (2). P. 410-415.
20. Кораблина И.В., Барабашин Т.О., Каталевский Н.И., Евсеева А.И. Мышьяк в промысловых рыбах пресноводных водоемов Северо-Кавказского региона и среде их обитания // *Водные ресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2. № 4. С. 48-59.
21. Защук О.Н., Курочкина Н.Г. Ветеринарно-санитарная оценка продуктов убоя, при отравлении животных соединениями, содержащими мышьяк // *Молодежь и наука*. 2017. № 1. С. 57-59.
22. Баканов К.Б., Бахарева А.А., Фадеева Ю.А., Гоностарева Д.А., Югова Т.С. Токсикологические аспекты использования мышьяка в практике врача // *Молодежь, наука, медицина. Материалы 64-й Всероссийской межвузовской студенческой научной конференции с международным участием*. 2018. С. 125-129.
23. Schild C.O., Giannitti F., Medeiros R.M., da Silva Silveira C., Caffarena R.D., Poppenga R.H., Riet-Correa F. Acute lead arsenate poisoning in beef cattle in Uruguay // *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2019. Vol. 31. No.2. P. 307-310.
24. Наход А.А., Поздняков А.М., Щербак Н.П. Соединение мышьяка и его действие на организм // *Успехи современного естествознания*. 2013. № 9. С. 119-120.
25. Никулин В.Н., Баева Е.А. Применение природного мела как минеральной добавки в кормлении сельскохозяйственных птиц // *Известия ОГАУ*. 2019. № 5(79). С. 258-261.
26. Bertin F.R., Baseler L.J., Wilson C.R., Kritchevsky J.E., Taylor S.D. Arsenic Toxicosis in Cattle: Meta - Analysis of 156 Cases // *Journal of veterinary internal medicine*. 2013. Vol. 27. No. 4. P. 977-981.
27. Gonçalves M.A., da Cruz R.A., Reis M.O., Pavarini S.P., Sonne L., Driemeier D. Vascular injury in spontaneous subacute toxicosis caused by organic arsenic in cattle // *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 2017. Vol. 37. P. 676-680.
28. Liao S.F., Hasan M.S., Yang Z., Stevens A.W., Brett J., Peng Z. Feeding Arsenic-Containing Rice Bran to Growing Pigs: Growth Performance, Arsenic Tissue Distribution, and Arsenic Excretion // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. No. 22. P. 8530.
29. Nemeč M., Holson J., Farr C., Hood R. Developmental toxicity assessment of arsenic acid in mice and rabbits // *Reproductive Toxicology*. 1998. No. 12(6). P. 647-658.
30. Mohanta R.K., Garg A.K., Dass R.S., Behera S.K. Effect of different sources of arsenic on intake, utilization of nutrients and growth performance in Guinea pigs // *Indian Journal of Animal Nutrition*. 2016. No. 33(1). P. 86-91.
31. Mamoun M.A., Qazi S.M., Alamgir I. Reduction of body and testicular weight of albino rats in arsenic toxicity // *Annals of Punjab Medical College (APMC)*. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 173-175.

32. Dong W.Q., Sun H.J., Zhang Y., Lin H.J., Chen J.R., Hong H.C. Impact on growth, oxidative stress, and apoptosis-related gene transcription of zebrafish after exposure to low concentration of arsenite // *Chemosphere*. 2018. Vol. 211. P. 648-652.
33. Алексеева Е.И. Тяжелые металлы и мышьяк в системе «почва-растение (кормовая культура)-животное» // *Актуальные проблемы экологии и природопользования. Материалы Всероссийской научно-практической конференции*. 2017. С. 25-29.
34. Архипкина Е.В., Якушкин, И. В. Практическое значение и эффективность применения энтеросорбентов в животноводстве // *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. 2016. № S2. С. 1-5.
35. Коновалов. А.С., Бутырин М.В. Оценка применимости гуминового препарата ГУМЭЛ для снижения токсичности почв, загрязненных мышьяком // *Плодородие*. 2014. № 1 (76). С. 40-41.
36. Islam M.S., Siddique A.B., Islam F., Mallick S. Phytoremediation of Arsenic Contaminated Soil by Vegetation // *BUET-ANWAR ISPAT 1-st Bangladesh Civil Engineering SUMMIT, BUET, Dhaka, Bangladesh*.
37. Григорьев А.А., Бородихин А.С., Руденко О.В., Сова Ю.А. Постановка эксперимента по идентификации модели гипераккумуляции тяжелых металлов при фиторемедиации почв // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 6. С. 873-873.
38. Ефремова М.А., Наумова Е.М. Изучение эффективности яровой пшеницы при фиторемедиации дерново-подзолистой почвы, загрязненной мышьяком // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2014. № 36. С. 60-64.
39. Патент № 2443771 РФ. Способ получения растительно-микробных ассоциаций для фиторемедиации на основе микроразмножаемых растений и плазмидсодержащих ризосферных бактерий / Бурьянов Я.И., Захарченко Н.С., Лебедева А.А., Захарченко А.В., Сизова О.И., Анохина Т.О., Сиунова Т.В., Кочетков В.В., Боронин А.М. – Оpubл. 27.02.2012, Бюл. №6.
40. Белоголова Г.А., Соколова М.Г., Гордеева О.Н. Влияние ризосферных бактерий на миграцию и биодоступность тяжелых металлов, мышьяка и фосфора в техногенно-загрязненных экосистемах. 2013. № 6. С. 69-77.
41. Сафонов В., Шишкина Е. Селемаг и гепатопротектор в профилактике послеродовых осложнений у коров // *Молочное и мясное скотоводство*. 2011. №5. С. 25-26.
42. Bjørklund G., Mutter J., Aaseth J. Metal chelators and neurotoxicity: lead, mercury, and arsenic // *Archives of toxicology*. 2017. Vol. 91. No. 12. P. 3787-3797.
43. Сафонов В. Значение минеральных элементов в крови высокопродуктивных коров // *Молочное и мясное скотоводство*. 2007. №4. С. 28-30.

44. Ордина Н.Б. Влияние антиоксидантов на содержание токсичных элементов в мясе цыплят-бройлеров // Проблемы и решения современной аграрной экономики. XXI Международная научно-производственная конференция. 2017. Т. 2. С. 35-36.
45. Ramanathan K., Balakumar B.S., Panneerselvam C. Effects of ascorbic acid and a-tocopherol on arsenic-induced oxidative stress // *Human & Experimental Toxicology*. 2002. Vol. 21. Iss. 12. P. 675-680.
46. Сафонов В.А. Препараты селена в коррекции пероксидного статуса и воспроизводительной функции коров // *Вестник РАСХН*. 2011. №3. С. 60-62.

References

1. Skalny A.V., Rudakov I.A. Bioelements in medicine. – M.: Publ. house "ONIX 21st century": World, 2004. – 272 p.
2. Oremland R.S., Stolz J.F. The ecology of arsenic // *Science*. 2003. Vol. 300. No. 5621. P. 939-944.
3. Vodyanitsky Yu.N. Chromium and arsenic in polluted soils // *Soil Science*. 2009. No. 5. P. 551-559.
4. Gasanov A.A., Naumov A.V., Petrov I.M. Russia in the world market of arsenic and its compounds // *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2016. No. 1-2. pp. 90-95.
5. Smetanin A.V., Pyshkin A.S., Osipov G.N., Sokhadze L.A., Smirnov M.K., Turygin V.V., Zhukov E.G., Potolokov V.N., Tomilov A.P., Fedorov V.A. Extraction of arsenic from industrial waste of non-ferrous metals // *Inorganic materials*. 2007. Vol. 43. No. 10. P. 1219-1229.
6. Samburova M.A., Safonov V.A. Accumulation of arsenic and heavy metals by living organisms on the territory of a technogenic formation in the Chelyabinsk region // *Fundamental principles of biogeochemical technologies and prospects for their application in nature conservation, agriculture and medicine. Proceedings of the XII International Biogeochemical School dedicated to the 175th anniversary of the birth of V.V. Dokuchaev*. Tula, 2021. P. 394-401.
7. Ebele B. Mechanisms of arsenic toxicity and carcinogenesis // *African Journal of Biochemistry Research*. 2009. Vol. 3. No. 5. pp. 232-237.
8. Valko M., Morris H., Cronin M.T.D. Metals, toxicity and oxidative stress // *Current medicinal chemistry*. 2005. Vol. 12. No. 10. P. 1161-1208.
9. Mucha S., Berezowski M., Markowska K. Mechanisms of arsenic toxicity and transport in microorganisms // *Postępy Mikrobiologii-Advancements of Microbiology*. 2019. Vol. 56. No. 1. P. 88-99.
10. Ermakov V.V., Safonov V.A., Yakimenko V.N. Express method for determining the activity of superoxide dismutase in the blood // *Reports of the MOIP: Plants. Ecology. Environment*. 2016. Vol. 62. P. 10-15.
11. Radysh I.V., Skalny A.V. Introduction to medical elementology. M.: Peoples' Friendship University of Russia, 2015. 200 p.

12. Ventsova I., Safonov V. The role of oxidative stress during pregnancy on obstetric pathology development in high-yielding dairy cows // American Journal of Animal and Veterinary Sciences. 2021. Vol. 16. No. 1. P. 7-14.
13. Quiterio-Pérez M., Gaytán-Oyartzún J.C., Gordillo-Martínez A.J., Prieto-García F. Teratogenic effect on bone tissue development in *Rattus norvegicus* Wistar strain, induced by the presence of arsenic // Dyna. 2018. No. 85(206). P. 242-249.
14. Abdushukurov D.A., Abdusamadzoda D., Abdulloev S.F., Osyonova L.N. Features of the absorption of trace elements by different varieties of grapes // Reports of the Tajik Academy of Agricultural Sciences. 2016. No. 1 (47). P. 17-22.
15. Kosolapov V.M., Chuikov V.A., Khudyakova Kh.K., and Kosolapova V.G., Russ. Mineral elements in feed and methods of their analysis: Monograph. M.: Ugresh Printing House LLC, 2019. 272 p.
16. Grigoriev A.A., Borodikhin A.S., Rudenko O.V. Evaluation of the influence of the degree of soil pollution with heavy metals on the process of Jerusalem artichoke vegetation // Modern problems of science and education. 2015. No. 1-1.
17. Rostami M., Abbaspour H. Effect of selenium on growth and physiological traits of basil plant (*Ocimum basilicum* L.) under arsenic stress conditions // Revista de Agricultura Neotropical. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 30-37.
18. Svambaeva E.A., Svambaev A., Tusupbekova S.T. The level of contamination with heavy metals of grain fodder intended for feeding animals and birds // Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Materials of the V International Conference. 2016. P. 585-587.
19. Safonov V. Assessment of heavy metals in milk produced by black-and-white Holstein cows from Moscow // Current Research in Nutrition and Food Science. 2020, Vol. 08. No. (2). P. 410-415.
20. Korablina I.V., Barabashin T.O., Katalovsky N.I., Evseeva A.I. Arsenic in commercial fish of freshwater reservoirs of the North Caucasus region and their habitat // Water resources and habitat. 2019. Vol. 2. No. 4. P. 48-59.
21. Zashchuk O.N., Kurochkina N.G. Veterinary and sanitary assessment of slaughter products, in case of poisoning of animals with compounds containing arsenic // Youth and science. 2017. No. 1. P. 57-59.
22. Bakanov K.B., Bakhareva A.A., Fadeeva Yu.A., Gonostareva D.A., Yugova T.S. Toxicological aspects of the use of arsenic in the practice of a doctor // Youth, science, medicine. Materials of the 64th All-Russian Interuniversity Student Scientific Conference with International Participation. 2018. P. 125-129.
23. Schild C.O., Giannitti F., Medeiros R.M., da Silva Silveira C., Caffarena R.D., Poppenga R.H., Riet-Correa F. Acute lead arsenate poisoning in beef cattle in Uruguay // Journal of Veterinary Diagnostic Investigation. 2019. Vol. 31. No.2. P. 307-310.
24. Nakhod A.A., Pozdnyakov A.M., Shcherbak N.P. Arsenic compound and its effect on the body // Successes of modern natural science. 2013. No. 9. P. 119-120.

25. Nikulin V.N., Baeva E.A. The use of natural chalk as a mineral supplement in the feeding of agricultural birds // *News of OSAU*. 2019. No. 5(79). P. 258-261.
26. Bertin F.R., Baseler L.J., Wilson C.R., Kritchevsky J.E., Taylor S.D. Arsenic Toxicosis in Cattle: Meta - Analysis of 156 Cases // *Journal of veterinary internal medicine*. 2013. Vol. 27. No. 4. P. 977-981.
27. Gonçalves M.A., da Cruz R.A., Reis M.O., Pavarini S.P., Sonne L., Driemeier D. Vascular injury in spontaneous subacute toxicosis caused by organic arsenic in cattle // *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 2017. Vol. 37. P. 676-680.
28. Liao S.F., Hasan M.S., Yang Z., Stevens A.W., Brett J., Peng Z. Feeding Arsenic-Containing Rice Bran to Growing Pigs: Growth Performance, Arsenic Tissue Distribution, and Arsenic Excretion // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. No. 22. P. 8530.
29. Nemec M., Holson J., Farr C., Hood R. Developmental toxicity assessment of arsenic acid in mice and rabbits // *Reproductive Toxicology*. 1998. No. 12(6). P. 647-658.
30. Mohanta R.K., Garg A.K., Dass R.S., Behera S.K. Effect of different sources of arsenic on intake, utilization of nutrients and growth performance in Guinea pigs // *Indian Journal of Animal Nutrition*. 2016. No. 33(1). P. 86-91.
31. Mamoun M.A., Qazi S.M., Alamgir I. Reduction of body and testicular weight of albino rats in arsenic toxicity // *Annals of Punjab Medical College (APMC)*. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 173-175.
32. Dong W.Q., Sun H.J., Zhang Y., Lin H.J., Chen J.R., Hong H.C. Impact on growth, oxidative stress, and apoptosis-related gene transcription of zebrafish after exposure to low concentration of arsenite // *Chemosphere*. 2018. Vol. 211. P. 648-652.
33. Alekseeva E.I. Heavy metals and arsenic in the system "soil-plant (fodder crop)-animal" // *Actual problems of ecology and nature management. Materials of the All-Russian scientific-practical conference*. 2017. P. 25-29.
34. Arkhitskaya E.V., Yakushkin, I.V. Practical significance and effectiveness of the use of enterosorbents in animal husbandry // *Electronic scientific and methodological journal of the Omsk State Agrarian University*. 2016. No. S2. P. 1-5.
35. Konovalov. A.S., Butyrin M.V. Evaluation of the applicability of the humic preparation GUMEL to reduce the toxicity of soils contaminated with arsenic // *Fertility*. 2014. No. 1 (76). P. 40-41.
36. Islam M.S., Siddique A.B., Islam F., Mallick S. Phytoremediation of Arsenic Contaminated Soil by Vegetation // *BUET-ANWAR ISPAT 1-st Bangladesh Civil Engineering SUMMIT, BUET, Dhaka, Bangladesh*.
37. Grigoriev A.A., Borodikhin A.S., Rudenko O.V., Sova Yu.A. Setting up an experiment to identify the model of heavy metal hyperaccumulation during soil phytoremediation // *Modern Problems of Science and Education*. 2013. No. 6. P. 873-873.

38. Efremova M.A., Naumova E.M. Study of the effectiveness of spring wheat in phytoremediation of soddy-podzolic soil contaminated with arsenic // News of the St. Petersburg State Agrarian University. 2014. No. 36. P. 60-64.
39. Patent No. 2443771 RU. A method for obtaining plant-microbial associations for phytoremediation based on micro-propagated plants and plasmid-containing rhizosphere bacteria / Buryanov Ya.I., Zakharchenko N.S., Lebedeva A.A., Zakharchenko A.V., Sizova O.I., Anokhina T.O., Siunova T.V., Kochetkov V.V., Boronin A.M. – Publ. 27.02.2012, Bul. No. 6.
40. Belogolova G.A., Sokolova M.G., Gordeeva O.N. Influence of rhizospheric bacteria on migration and bioavailability of heavy metals, arsenic and phosphorus in technogenically polluted ecosystems. 2013. No. 6. P. 69-77.
41. Safonov V., Shishkina E. Selemag and hepatoprotector in the prevention of postpartum complications in cows // Dairy and beef cattle breeding. 2011. No.5. P. 25-26.
42. Bjørklund G., Mutter J., Aaseth J. Metal chelators and neurotoxicity: lead, mercury, and arsenic // Archives of toxicology. 2017. Vol. 91. No. 12. P. 3787-3797.
43. Safonov V. The value of mineral elements in the blood of highly productive cows // Dairy and meat cattle breeding. 2007. No. 4. P. 28-30.
44. Ordina N.B. Influence of antioxidants on the content of toxic elements in the meat of broiler chickens // Problems and solutions of modern agrarian economics. XXI International Scientific and Production Conference. 2017. Vol.2. P. 35-36.
45. Ramanathan K., Balakumar B.S., Panneerselvam C. Effects of ascorbic acid and a-tocopherol on arsenic-induced oxidative stress // Human & Experimental Toxicology. 2002. Vol. 21. Iss. 12. P. 675-680.
46. Safonov V.A. Selenium preparations in the correction of peroxide status and reproductive function of cows // Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2011. No. 3. P. 60-62.

Гладышев Вадим Борисович – ассистент	Gladyshev Vadim Borisovich – assistant
Мазуркин Петр Иванович – лаборант	Mazurkin Petr Ivanovich – laboratory assistant
recultivat@mail.ru	

Received 04.03.2022