

На правах рукописи



БЕЛЯНОВСКАЯ АЛЕКСАНДРА ИГОРЕВНА

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ОРГАНИЗМА МЛЕКОПИТАЮЩИХ ПРИРОДНО-
ТЕХНОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ИХ РАНЖИРОВАНИЕ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ USETOX

Специальность – 25.00.36 Геоэкология (науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск-Бордо - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и Национальной высшей школе искусств и ремёсел, г. Бордо, Франция

Научный руководитель:

Барановская Наталья Владимировна
доктор биологических наук, доцент,
профессор ОГ ИШПР ТПУ

Научный консультант

Перри Николя
Ph.D., профессор Национальной высшей
школе искусств и ремёсел, г. Бордо, Франция

Официальные оппоненты:

Сысо Александр Иванович
доктор биологических наук, старший
научный сотрудник, директор Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Институт почвоведения и агрохимии
Сибирского отделения Российской академии
наук (ИПА СО РАН), заведующий
лабораторией биогеохимии почв г.
Новосибирск;

Паничев Александр Михайлович
доктор биологических наук, кандидат геолого
– минералогических наук, ведущий научный
сотрудник Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Тихоокеанский Институт Географии
Дальневосточного отделения Российской
Академии Наук, г.Владивосток.

Защита состоится «05» декабря 2019 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.29 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 406.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Барановская Наталья Владимировна

Введение

Геохимическая мозаичность биосферы, обусловленная различными природно-техногенными условиями, значительно меняется в связи с развитием человека и общества. Добыча полезных ископаемых, их переработка, использование и утилизация, строительство и эксплуатация промышленных объектов ведет к значительной смене геоэкологических условий существования живых организмов, включая человека. Повышенное поступление определенных химических элементов в природную среду ярко отражается в элементном составе биоты. Живые организмы становятся геоиндикаторами антропогенной преобразованности локальных территорий. Основные результаты исследования химического состава биологических объектов: растений, животных и человека, как геоэкологических индикаторов были представлены в работах Виноградова А.П., Виноградовой Л.Д., Ковальского В.В., Добровольского В.В., Перельмана А.И., Ковалевского А.Л., Киста А.А., Кабаты-Пендиас А. и Пендиас Х., Ткалича С.М., Саенко Г.Н., Авцына А.П., Малюги Д.П., Bowen H.J.M., Fortescue J.A.C., Kalani D.K., Жаворонкова А.А., Риша М.А., Ермакова В. В., Моисеенко Т.И., Сусликова В.Л., Агаджаняна Н.А., С.Ф. Тютикова, В.А. Алексеенко, М.С. Панина, Мальгина М.А., Ильина В.Б., Христофоровой Н.К., Пузанова А.В. и многих других авторов.

Современные геоэкологические исследования различных территорий (Белан Л.Н., В.Н. Удачин, В.С. Безель, Паничев А.М., А.М. Сысо, В.Д. Страховенко, Ю.В. Робертус, Леонова Г.А., Коробова Е.М., Курамшина Н.Г., Шаймарданова Б.Х., Корогод Н.П. и многие другие) доказывают факт тесной взаимосвязи живых организмов со средой, о которой говорил еще В.И. Вернадский (1960). Однако, во многих исследованиях отсутствуют данные о взаимодействиях химических элементов в рамках разных локальных эколого-геохимических условий, редко рассматривается их широкий спектр, мало внимания уделяется комплексному подходу с применением модели оценки воздействия на живые организмы. Однако, сложная экологическая обстановка локальных территорий, обусловленная техногенным воздействием промышленности, создает необходимость такой оценки потенциального негативного воздействия на здоровье населения.

Метод Оценки жизненного цикла (ОЖЦ), один из ведущих инструментов экологического менеджмента в Европейском союзе, позволяет отслеживать величину и значимость воздействия на окружающую среду, и человеческий организм. В Российской Федерации данный метод в связи с принятием международных стандартов – ГОСТы Р ИСО 14040-14043 (Притужалова, 2007) все больше входит в практику оценки рисков для населения и экосистем (Сидоренко, Михеев, 2017; Перминова, 2017; Ялалтдинова, 2015; Старостина, Уланова, 2013; Мамаджанов, Сидоренко, Латушкина 2011.). Модель широко применяется в работах иностранных исследователей (Peña, 2018; Ortiz de García, 2017; Rosenbaum, 2011) и признана мировым научным сообществом. Показатель негативного воздействия – характеристический коэффициент (CF) является табличным значением, предлагаемым моделью для 25 неорганических и 3000

органических соединений в зависимости от территориального расположения региона. В данной работе, однако предлагается модификация данного коэффициента с помощью внедрения результатов биогеохимического анализа территории с различной эколого-геохимической ситуацией, с целью их дальнейшего ранжирования, что определяет и актуальность исследования.

Цель работы. Оценка геоэкологического состояния локальных территорий Сибири, Забайкалья и Казахстана с использованием показателей элементного состава органов и тканей млекопитающих и их ранжирование по степени токсичности отдельных элементов.

Для её решения были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести отбор проб биологического материала млекопитающего *Sus scrofa domestica* на локальных территориях с различными геоэкологическими условиями функционирования природно-техногенных систем;

2. Установить индикаторные показатели содержания концентрирования и соотношения химических элементов в органах и тканях, а также биологической жидкости организма млекопитающего для локальных территорий России и Казахстана;

3. Выявить биогеохимическую специфику формирования барьерных свойств систем органов и её изменение в условиях урбанизации и хозяйственной деятельности человека

4. Модифицировать метод расчета характеристического фактора токсичности для здоровья населения с использованием модели USEtox с внедрением результатов химического анализа отобранного биоматериала;

5. Ранжировать территории по величине характеристического фактора токсичности для здоровья населения.

Основные защищаемые положения:

1. В различных эколого-геохимических условиях среды обитания в организме млекопитающего (*Sus scrofa domestica*) формируются специфичные корреляционные взаимосвязи химических элементов с Cr (Eu-Cr-Yb Павлодарская область г. Экибастуз; Cr--Ca, Газимуромский завод, Тайна, Калга, Уровские ключи Забайкальский край ; Cr-Sb пос. Кижирова, Верхнее Сеченово Томский район), изменяются абсолютные содержания и коэффициенты концентрации химических элементов, изменяются отношения элементов (Th/U, Rb/Cs), что может служить индикатором этих условий.

2. Элементный состав органов и тканей млекопитающих отражает специфику техногенеза территорий их обитания в виде концентрирования определенного спектра элементов на барьерных органах. В эмбрионах мелких млекопитающих в условиях воздействия Среднеуральского медеплавильного комбината накапливаются Sb, Cr, РЗЭ (Sm, Ce, La, Lu), Zn, Br, U. На плацентарном барьере женщин-жителей приближенных к Северному промышленному узлу районов концентрируются Th, Br, Zn, Sm, Hf. В зоне воздействия Северного промышленного узла Томского района также нарушается работа гематоэнцефалического барьера с аккумулярованием в тканях головного и спинного мозга Rb, Ba, Au, Fe, Cs. В зоне действия добывающей и энергетической

промышленности города Экибастуз максимальное накопление элементов приходится на барьер толстого кишечника.

3. Рассчитанный индекс токсичности увеличивается под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека. Расчет индекса токсичности элементов для здоровья населения согласно их содержанию в мышечной ткани млекопитающего при нормализации к почвам позволяет ранжировать территории по снижению показателя в следующем порядке:

1. Для **Cr** Забайкальский край> Павлодарская область> Республика Тыва> Томская область> Восточно-Казахстанская область

2. Для **Zn, As, Sb, Ba** Забайкальский край> Павлодарская область> Восточно-Казахстанская область> Томская область> Республика Тыва.

Фактический материал и методы исследований.

В основу диссертационной работы положены результаты исследований, проводимых лично автором, а также совместно с сотрудниками отделения Геологии Инженерной школы Природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. В работе также рассмотрен и использован материал, предоставленный коллегами–сотрудниками института г. Екатеринбурга (Институт Экологии Растений и Животных УрО РАН) и материал, отобранный в городе Томск к. м. н. Станкевич С.С., руководитель Центра поддержки грудного и рационального вскармливания г. Томска.

В рамках работы было рассмотрено 186 проб органов и тканей Свиньи домашней (*Sus scrofa domesticus*), представляющих все системы органов животного. Для откорма животных, выбранных для исследования, использовались 2 сорта комбикормов, отвечающие требованиям ГОСТ, возраст животных составлял от 3-6 месяцев. Основные территории отбора проб: населенные пункты Кижирowo и Верхнее Сеченово Томского района Томской области (Россия) и город Экибастуз Павлодарской области (Республика Казахстан), для проведения сравнительного анализа рассматривались данные, полученные по другим регионам России и Казахстана, а именно поселки Уровские ключи, Газимурский завод, Тайна, Калга Забайкальского края, поселок Хову-Аксы Республики Тыва а также поселок Путинцево Восточно-Казахстанской области Казахстана.

Для количественного определения химических элементов в компонентах природной среды использовались следующие методы: инструментальный нейтронно–активационный анализ (ИНАА), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Анализ образцов методом ИНАА проводился на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т в ядерно–геохимической лаборатории (ЯГЛ) кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета (аттестат аккредитации RA.RU.21AB27 от 08.04.2015); аналитики – с. н. с. А.Ф. Судыко и Л.Ф. Богутская) согласно инструкции НСАМ ВИМС № 410-ЯФ. Анализ образцов методом ИСП-МС проводился в аналитическом центре ООО «Химико-аналитический центр «Плазма» (руководитель – Федюнина Н.В.). Вода биологическая анализировалась в аккредитованном научно-образовательном

центре «Вода» Национального исследовательского Томского политехнического университета (руководитель центра к.г.-м.н. Копылова Ю. Г.).

Достоверность защищаемых положений обеспечена статистически значимым количеством проб, проанализированных современными высокочувствительными аттестованными аналитическими методами (ИНАА, ИСП-МС) в аккредитованных лабораториях, а также глубиной проработки фактического материала с использованием современных методов статистической обработки и литературы по теме исследования.

Научная новизна. Впервые при изучении элементного состава 176 проб органов и тканей Свиньи домашней (*Sus scrofa domesticus*) методами ИНАА и ИСП-МС установлены индикаторные показатели соотношения химических элементов в органах и тканях млекопитающих, обитающих в условиях функционирования локальных природно-техногенных систем на территории России и Казахстана. Установлена специфика функционирования биогеохимических барьеров внутри организмов млекопитающих (плацентарный барьер, гематоэнцефалический барьер, барьер пищеварительной системы) и её изменение в условиях техногенеза. Модифицирован расчет характеристического коэффициента токсичности для 5 химических элементов для 4 локальных территорий Сибири, Забайкалья и Казахстана. Впервые представлено ранжирование локальных территорий Сибири, Забайкалья и Казахстана по величине характеристического коэффициента токсичности для здоровья населения.

Практическая значимость. Выявленные особенности концентрирования и распределения химических элементов в органах и тканях Свиньи домашней на территориях с разными геоэкологическими условиями позволяет дифференцировать их по степени экологической нагрузки, что может являться полезным дополнением к проведению геоэкологического мониторинга территорий.

Метод модификации модели оценки воздействия USEtox с использованием результатов химического анализа может использоваться в качестве локального дополнения в оценке токсического воздействия на население. Данный метод позволяет расширить модель с использованием локальных данных о химическом составе пищевого продукта – свинины, и в дальнейшем может применяться в оценке рисков для здоровья населения изучаемых территорий.

Материалы, полученные в процессе выполнения работы, были использованы при подготовке практических занятий по курсу: «Оценка экологических рисков» в Отделении Геологии Инженерной школы Природных ресурсов Томского политехнического университета для подготовки бакалавров по специальности «Экология и природопользование», а также могут быть использованы в курсах «Экология», «Геохимия живого вещества» и «Медицинская геология» для подготовки магистров по направлению «Экология и природопользование». Полученные данные могут быть использованы органами здравоохранения и природоохраны.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на Всероссийских и Международных симпозиумах и конференциях:

Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2015–2019); «Medgeo 2016» (г. Москва 2016); Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека (г. Томск, 2016); Международной конференции «Ecodesign» (г. Токио, Япония, 2018); Международной конференции CEST 2019 (о. Родос, Греция 2019). Кроме того, результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах в отделении Геологии ТПУ (г. Томск, Россия), и лаборатории I2M Национальной высшей школы искусств и ремесел (г. Бордо, Франция).

Публикации. Основное содержание и научные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 статьях и тезисах докладов, в том числе 2 в журналах, рекомендованных ВАК и 2 индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы и приложения, изложенных на 157 страницах машинописного текста. Она включает 93 рисунка и 28 таблиц. Список литературы содержит 166 источников, 74 из которых на иностранном языке.

Во введении указаны актуальность исследований, определены цель и задачи, показаны основные результаты, представлена их научная новизна и практическая значимость, а также обозначен личный вклад автора и апробация работы. **В первой главе** рассматриваются особенности функционирования биогеохимических барьеров живого организма, и исключительная роль элементного состава органов Свиньи домашней (*Sus scrofa domesticus*) как индикатора геоэкологических обстановок. **Во второй главе** рассматриваются способы анализа экологического состояния окружающей среды, изучение природной среды биогеохимическими методами исследований и методом оценки жизненного цикла. **В третьей главе** приводится краткое геотектоническое литологическое и металлогеническое описание и геоэкологическая характеристика районов исследования. **В четвертой главе** описываются методика проведения исследований, способы отбора проб, их последующей подготовке, методах анализа, приемах математической обработки данных, а также методических основах модели USEtox. **Пятая глава** посвящена статистическим параметрам накопления элементов в организме Свиньи домашней, рассчитаны средние содержания, рассчитаны коэффициенты корреляции и вариации элементов во всей изученной выборке. **В шестой главе** рассматриваются основные индикаторы техногенеза. Проведен сравнительный анализ содержания химических элементов в пробах органов и тканей млекопитающих, отобранных на территории Томского района, Забайкальского края и Павлодарской области. **В седьмой главе** описываются особенности распределения и концентрирования элементов в барьерных системах органов. **Восьмая глава** посвящена применению модели USEtox при оценке токсичности элементов для здоровья населения, а также методике расчетов характеристического коэффициента токсичности с использованием локальных данных, как на уровне регионов (исследованные в работе области), так и на уровне стран (собственные расчеты и литературные

данные. В **заключении** рассматриваются основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Личный вклад автора заключается в отборе 33 проб биологического материала Свиньи домашней на территории города Экибастуз Павлодарской области. В подготовке проб к химическим анализам ИНАА, ИСП-МС, и к выделению воды биологической из организма млекопитающего методом Дина Старка. Автор принимал участие в отборе проб биоматериала мелких млекопитающих совместно с сотрудниками Института экологии растений и животных Уральского отделения Академии наук. Автором лично проведена статистическая обработка всех данных, дана интерпретация полученных результатов и сформулированы защищаемые положения. Автором проводился расчет характеристических коэффициентов токсичности для Cr, Zn, As, Ba, Sb, а также при совместной работе с научными руководителями (Belyanovskaya et al., 2019) была разработана методика расчета характеристического коэффициента токсичности в модели USEtox.

Благодарности. Автор выражает огромную благодарность научному руководителю, доктору биологических наук, профессору кафедры отделения геологии Барановской Наталье Владимировне, а также научным консультантам, PhD Бертрану Ларатту, PhD, профессору Национальной высшей школы искусств и ремесел, Бордо Николя Перри за научное сопровождение, всестороннюю поддержку, понимание, мотивацию и помощь на всех этапах реализации работы. Особую благодарность автор выражает доктору геолого-минералогических наук, профессору отделения геологии Рихванову Леониду Петровичу за ценные советы, рекомендации и всестороннюю помощь. Автор признателен за помощь всем сотрудникам и студентам отделения геологии ИШПР ТПУ, сотрудникам Национальной высшей школы искусств и ремесел, Бордо Франция. За ценные советы и/или предоставление материала, автор выражает отдельную признательность профессору, к.б.н. Н.П. Корогод, д.б.н. В.С. Безеля, С. В, к.б.н. Мухачевой, д.г–м.н. Е. Г. Язикову, профессору, д.г–м.н. С. И. Арбузову, к.г.–м.н. А. Р. Ялалтдиновой, к.г-м.н. PhD Т.А. Братек, аспирантам М.А. Дериглазовой, А. Н. Злобиной. Автор глубоко благодарен исполнителям аналитических исследований: с.н.с А. Ф. Судыко, Л. В. Богутской, А.А. Хвощевской, Ю.Г. Копыловой, Н.В. Федюниной. Автор выражает особую благодарность за всестороннюю поддержку А.И. Беляновскому. Работа выполнялась при финансовой поддержке спонсора партнерской исследовательской деятельности Национальной высшей школы искусств и ремесел, г. Бордо Франция – компании AMVALOR.

*ПОЛОЖЕНИЕ 1. В различных эколого-геохимических условиях среды обитания в организме млекопитающего (*Sus scrofa domesticus*) формируются специфичные корреляционные взаимосвязи химических элементов с Cr (Eu-Cr-Yb Павлодарская область г. Экибастуз; Cr–Ca, Газимуромский завод, Тайна, Калга, Уровские ключи Забайкальский край ; Cr-Sb пос. Кижирово, Верхнее Сеченово Томский район), изменяются абсолютные содержания и коэффициенты концентрации химических элементов, изменяются*

отношения элементов (Th/U , Rb/Cs), что может служить индикатором этих условий.

Влияние окружающей среды на элементный состав живых организмов неоспорим, и географическое расположение региона играет ведущую роль в формировании химического состава живых организмов. Анализ валовых концентраций химических элементов в трех системах органов (костная ткань, кишечник, покровные ткани) млекопитающего Свинья домашняя (*Sus scrofa domesticus*) позволил выявить элементы специфичные для каждой изученной территории (рис. 1).

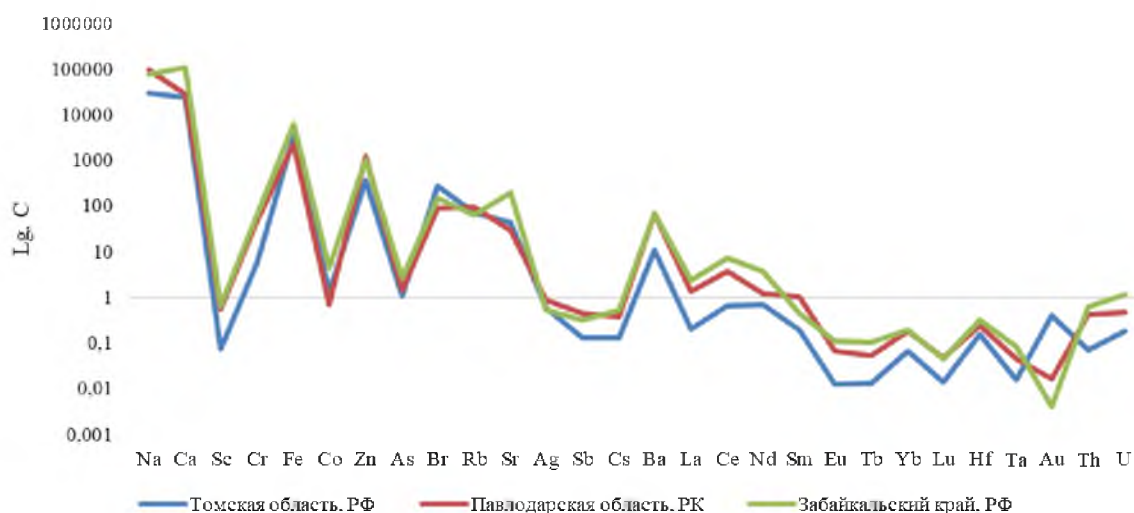


Рисунок 1. Индикаторные изменения содержания химических элементов в органах и тканях, отобранных на изученных локальных территориях, мг/кг зольного остатка, шкала логарифмическая

Прим.: РФ – Российская Федерация; РК – республика Казахстан

По абсолютным значениям содержания органы и ткани животного из Забайкальского края отличаются от Томской области и Павлодарской области (Республика Казахстан) более высокими концентрациями всех изученных химических элементов, с некоторыми исключениями. Томский район Томской области отличается повышенными концентрациями Br, Au во всех изученных пробах, и преимущественно в органах дыхательной и кровеносной систем. Органы и ткани животного из города Экибастуз Павлодарской области, накапливают Na, Zn, Rb, Ag, Sm, Lu, с преимущественным концентрированием в органах пищеварительной и опорно-двигательной систем. Распределение специфичных элементов внутри организма зависит от регионального аспекта. Органы-локализаторы Br, Au, Na, Zn, Rb, Ag, Sm, Lu в разных исследуемых районах не совпадают. Описанные выше различия концентраций вероятно связаны с различными путями поступления элементов в организм.

Региональный аспект формирования элементного состава органов и тканей живого организма также отражается при анализе корреляционных связей между элементами. Построение значимых их корреляционных связей ($>0,7$) в зольном

остатке биоматериала показывает, что во всех выборках основным элементом, образующим большинство связей является хром (рис. 2).



Рисунок 2. Корреляционные взаимосвязи химических элементов в зольном остатке Свиньи домашней (*Sus scrofa domesticus*), ($>0,7$ при критическом значении коэффициента значимости $0,5$)

Хром в трех выборках (Томский район Томской области, населённые пункты Забайкальского края, г. Экибастуз Павлодарской области) ведет себя по-разному, связываясь с элементами в зависимости от территории. В пробах из Экибастуза хром образует значимые корреляционные связи с редкоземельными элементами. В пробах из Томской области хром коррелирует с Fe, Co, Sb, данные элементы являются типичными для выбросов местных производств (Рихванов, 2013).

Для проб из Забайкальского края характерной является ассоциация хрома с кальцием. Подобное взаимоотношение не может объясняться исключительно природной составляющей, поскольку известно, что для костей из этих двух металлов именно кальций является основой гидроксилапатита – основного минерала костной ткани. Сильная негативная связь между хромом и кальцием вероятно является следствием антропогенной загруженности и усиленного поступления хрома в живой организм, вследствие чего данный металл начинает значимо связываться с кальцием.

При этом детально рассматривая корреляционные взаимодействия элементов только в костной ткани (рис. 3), можно отметить, что значимые отрицательные корреляционные связи элементов с кальцием отмечаются только в костной ткани животного из населенных пунктов Забайкальского края. Здесь к кальцию, помимо хрома проявляют антагонизм такие элементы как бром в комплексе с торием.

Каждый регион сохраняет свое «геохимическое лицо» и при отдельном рассмотрении костной составляющей. Пробы из города Экибастуз представлены взаимодействиями редкоземельных элементов с гафнием и цезием, а в Томском районе ассоциациями элементов с бромом и сурьмой.

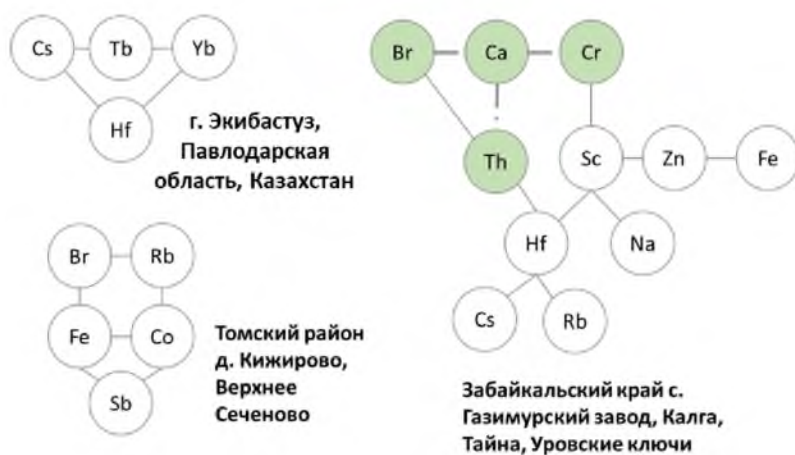


Рисунок 3. Значимые корреляционные связи элементов в костной ткани Свиньи домашней (*Sus scrofa domestica*), ($>0,7$ при критическом значении коэффициента значимости 0,5)

Региональный аспект формирования элементного состава органов и тканей млекопитающего отражается также и при рассмотрении Rb-Cs отношения (рис. 4). Эти два элемента формируют значимую корреляционную связь в 3 изученных выборках. С одной стороны, рубидий и цезий, как щелочные металлы химически близки друг другу и также относятся к одной геохимической литофильной группе элементов. Однако, соотношение Rb-Cs является информативным при ранжировании территорий по степени экологической нагрузки, где рубидий представляет собой природный фактор формирования элементного состава, а цезий условно техногенный.

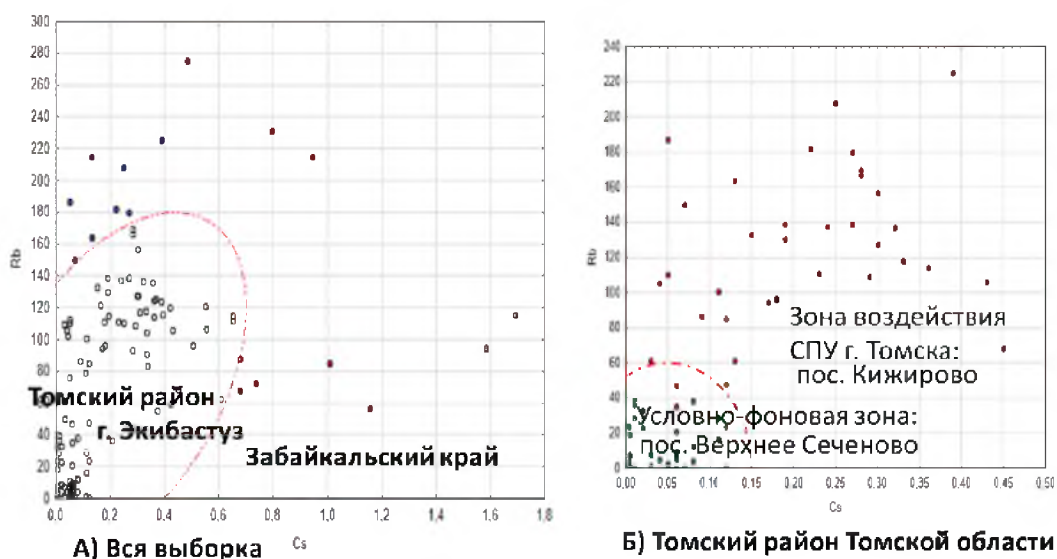


Рисунок 4. Точечная диаграмма распределения Rb-Cs в пробах органов и тканей Свиньи домашней (*Sus scrofa domestica*) из всех изученных территорий

Прим.: Б) Красным цветом выделена зона воздействия СХК – Кижирова, зеленым фоновая зона – Верхнее Сеченово

Пробы, отобранные на территории г. Экибастуза Павлодарской области и Забайкалья, имеют более высокие содержания цезия, чем пробы из Томского района Томской области. Несмотря на то, что организм млекопитающего Томского района содержит больше рубидия, чем цезия, при рассмотрении всей выборки (рис. 4 А), анализ Rb/Cs отношения в органах и тканях животных внутри

Томского района убедительно показывает повышенное содержание цезия в пробах, которые были отобраны в зоне влияния промышленных объектов Томского района, включающих Сибирский химический комбинат, как доказанный источник цезия (Рихванов, 1997).

Торий-урановое отношение в изученных пробах варьирует, от более высокого в Павлодарской области ($\text{Th/U}=0,9$), до относительно низкого в Томской районе ($\text{Th/U}=0,7$).

Изменение содержаний и соотношений элементов подчеркивает зависимость химического состава живого вещества от окружающей среды и путей их поступления в организм, и подчеркивает состоятельность биологических объектов как геоиндикаторов изменения эколого-геохимических обстановок локальных территорий.

ПОЛОЖЕНИЕ 2. Элементный состав органов и тканей млекопитающих отражает специфику техногенеза территорий их обитания в виде концентрирования определенного спектра элементов на барьерных органах. В эмбрионах мелких млекопитающих в условиях воздействия Среднеуральского медеплавильного комбината накапливаются Sb, Cr, РЗЭ (Sm, Ce, La, Lu), Zn, Br, U. На плацентарном барьере женщин-жителей, приближенных к Северному промышленному узлу районов, концентрируются Th, Br, Zn, Sm, Hf. В зоне воздействия Северного промышленного узла Томского района также нарушается работа гематоэнцефалического барьера с аккумулярованием в тканях головного и спинного мозга Rb, Ba, Au, Fe, Cs. В зоне действия добывающей и энергетической промышленности города Экибастуз максимальное накопление элементов приходится на барьер толстого кишечника.

Согласно работам А.И. Перельмана, В.И. Алексеенко и др. в геологии биогеохимическими барьерами называются участки геосистем, на которых на коротких расстояниях, в виду физико-химических и биологических процессов происходит накопление одних элементов и удаление других. Схожие процессы имеют место быть и внутри живого организма, вследствие изменения рН внутренней среды, функционирования микроорганизмов и тд. Именно работа барьерных систем определяет неравномерность распределения элементов в живом веществе, и является одной из причин высокого коэффициента их вариации.

Среди существующих защитных механизмов организма особо выделяются барьерные и депонирующие системы. Внутренние барьеры организма, такие как гематоэнцефалический барьер, барьер пищеварительной системы, плацентарный барьер способны снижать миграцию элементов, значительно повышая их концентрацию в своих тканях. Однако, в условиях техногенного воздействия окружающей среды работа этих барьеров может нарушаться. На примере организмов мелких млекопитающих вида Полевка рыжая (*Myodes glareolus*) ярко прослеживается зависимость между накоплением химических элементов на плаценте, по мере удаления от источника загрязнения (Беляновская и др., 2016).

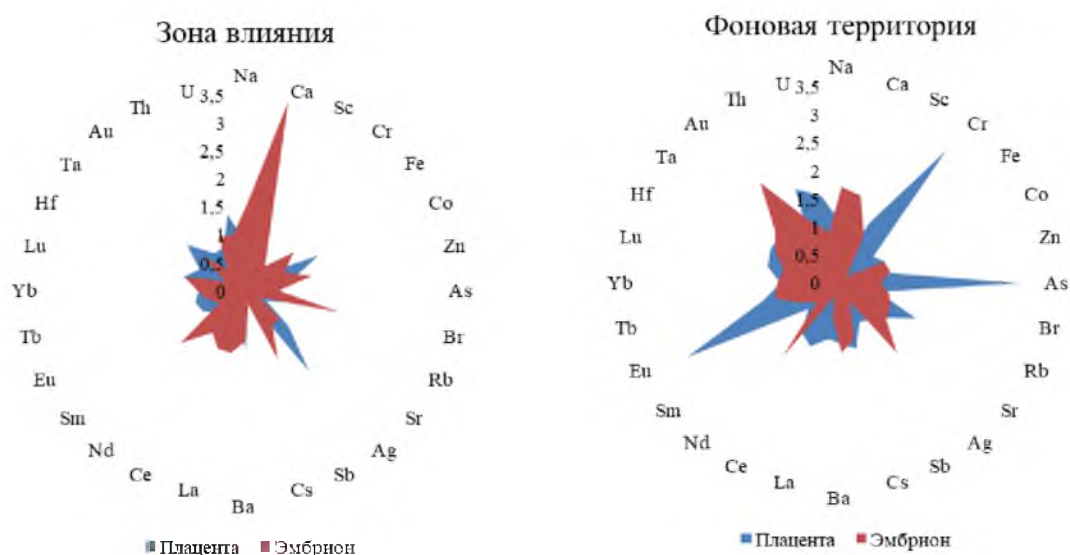


Рисунок 5. Геохимическая специфика биологического материала мелких млекопитающих, коэффициент концентрации относительного среднего арифметического содержания элементов в выборке, метод ИНАА

На примере построения биогеохимических рядов можно отметить, что суммарный коэффициент концентрации в эмбрионе млекопитающего значительно ниже в зоне, удаленной от источника загрязнения, чем на территории приближенной к предприятию.

Таблица 1. Биогеохимические ряды концентрации элементов и суммарный коэффициент концентрации в биоматериале мелких млекопитающих

Биоматериал:	Планта	Эмбрион
Территория	Импактная зона	Импактная зона
Элементы	Ba _{1,9} -Yb _{1,8} -Ag _{1,7} -Sm _{1,6} -Ta _{1,4} =Co=Lu _{1,3} -U _{1,2} -Br _{1,1} =Ca-Zn ₁ =Au	Fe _{2,7} -Sb _{2,2} =Cr -Ca _{1,9} -Sm _{1,8} -Ce _{1,7} -La _{1,5} -Zn _{1,3} =Br- U _{1,1} =Lu
КК _{сумм}	27	30
Территория	Контрольная зона	Контрольная зона
Элементы	As _{1,5} =Ce=U _{1,3} =Sb=Cr=Eu _{1,2} =Th=Yb=Sm-Lu _{1,1} -La=Rb=Fe-Ta _{1,09} -Ca _{1,08} -Na _{1,06} -Zn _{1,01} -Tb ₁	Au _{1,3} =Nd-Rb _{1,2} -Ag _{1,1} =Hf=Tb=Th=Cs-Ba _{1,09} =Ta -Eu _{1,07} -Na _{1,03} =U-Sr _{1,01} =Lu
КК _{сумм}	30	26

Эта же тенденция отслеживается и при рассмотрении влияния эколого-геохимической обстановки на элементный состав плаценты жительниц города Томска. Диаграмма распределения содержания химических элементов в плаценте женщин, проживающих на территориях разных районов г. Томска позволяет выделить Ленинский район, как область, в пробах жительниц которой содержится большее количество химических элементов, чем в пробах биоматериалов жительниц проживающих в другой части города. В биоматериале из Ленинского района содержится больше Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, Ba, La, Hf, Th. Пробы из

Кировского района отличаются содержаниями Na, Br, Cs, Ce, Nd, Eu, Au, из Октябрьского Ta и U. Особенностью Ленинского района является большее содержание Rb, Ag, Lu. Вероятно, причиной повышенных (в сравнении с другими районами города) содержаний химических элементов в тканях плаценты женщин, проживающих в Ленинском и Кировском районе, является его относительная экологическая не благополучность – в северной части города сконцентрированы местные котельные и частный сектор, которые являются источниками частиц шлака, золы, (Na, Ca, Fe, Zn, Cr, Co) (Язиков, 2010). По данным оценки эколого-геохимического состояния г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв, Ленинский и Кировский район выделяется, как антропогенно нагруженный, также в пылеаэрозолях, отобранных на территории данного района обнаруживается наибольшее сосредоточение сажи и шлака (Язиков, 2010).

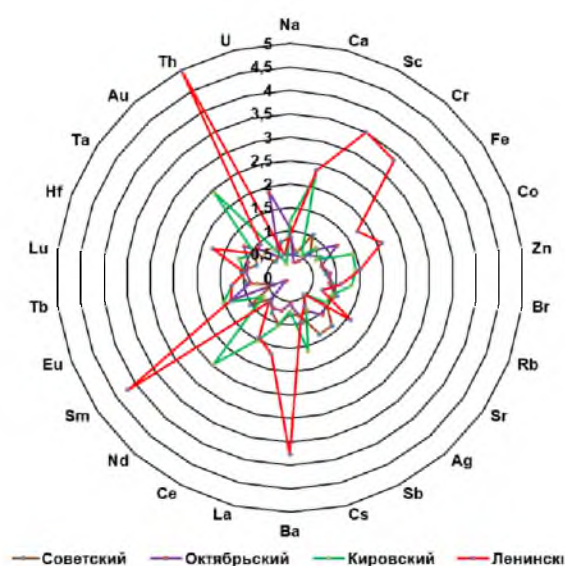


Рисунок 6. Геохимическая специфика плацентарной ткани жительниц г. Томска, коэффициент концентрации относительного среднего арифметического содержания элементов в выборке, метод ИНАА

Другой значимой барьерной системой организма являются слизистые оболочки желудочно-кишечного тракта и носоглотки. Высокое накопление химических элементов в данной системе, как правило, говорит о постоянном поступлении химического элемента извне, что может меняться в зависимости от потребленного корма, питьевой воды, загрязнения и состава почвы, которые в свою очередь зависят от географического происхождения (Franke et al., 2005; Kim et al., 2017; Park et al., 2018).

Результаты исследования показывают, что среди всех изученных систем органов именно пищеварительная система накапливает в себе наибольшее количество элементов, как на территории г. Экибастуз, так и в Томской районе. Однако, в Экибастузе, как в более экологически нагруженной зоне барьерный механизм пищеварительной системы проявляется ярче, в то время как в Томском районе эта система накапливает элементы наравне с кровеносной (рис. 7).

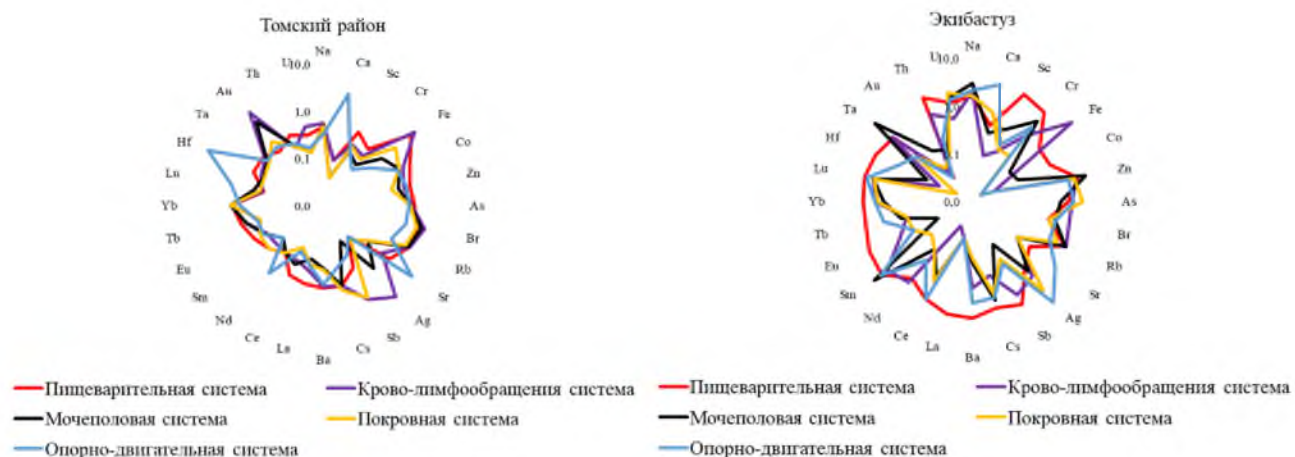


Рисунок 7. Коэффициент концентрации химических элементов в системах органов Свиньи домашней (*Sus scrofa domestica*) на территории г. Экибастуз, Томский район, мг/кг зольного остатка, шкала логарифмическая

Максимальное аккумулярование элементов отмечается в толстом кишечнике может быть рассмотрено на примере редкоземельных и радиоактивных элементов, а также для Cr, Sb, Ba, Zn, As (рис. 8), крайне токсичных для организма в больших дозах, и концентрирующихся исключительно в тканях толстого кишечника.

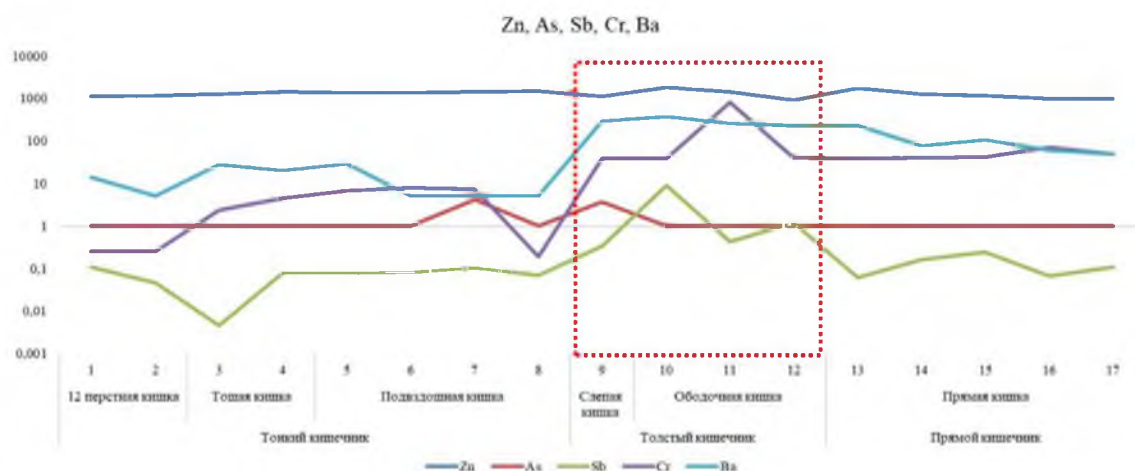


Рисунок 8. Содержание Zn, As, Sb, Cr, Ba в кишечнике Свиньи домашней (*Sus scrofa domestica*), г. Экибастуз, мг/кг зольного остатка, шкала логарифмическая

Анализ поведения редкоземельных и радиоактивных элементов (рис. 9) показывает, что толстый кишечник является основной зоной их всасывания, но поведение элементов изменяется в зависимости от территории пробоотбора (рис. 10). В кишечнике животного из г. Экибастуза Павлодарской области отмечается значительное повышение содержания элементов в прямом кишечнике. Это отражает пути их выведения из организма, чего не происходит в организме животного из Томского района Томской области, где элементы всасываются в толстом кишечнике, и вероятно перераспределяются в организме.

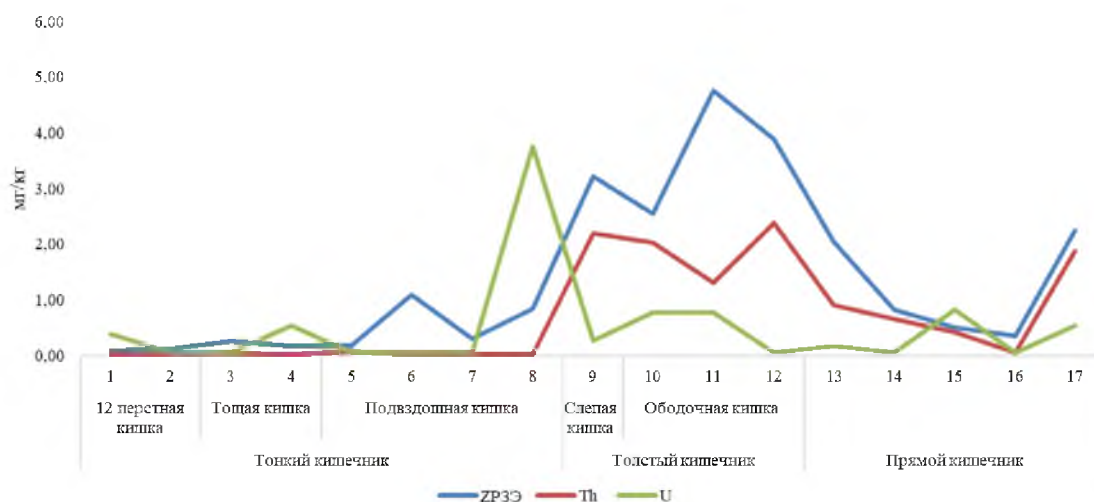


Рисунок 9. Содержание редкоземельных и радиоактивных элементов в кишечнике Свиньи домашней (*Sus scrofa domesticus*), г. Экибастуз, мг/кг зольного остатка, шкала логарифмическая

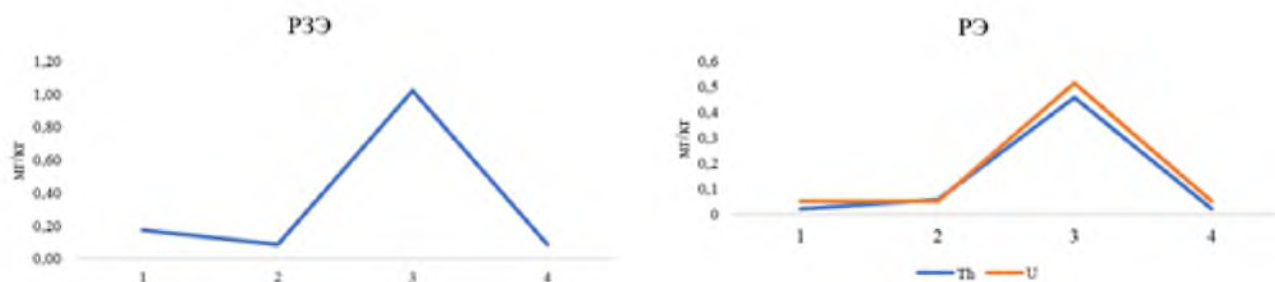


Рисунок 10. Содержание радиоактивных элементов в кишечнике Свиньи домашней, Томский район, мг/кг зольного остатка

Прим.: 1 – двенадцатиперстный кишечник; 2 – тонкий кишечник; 3 – толстый кишечник; 4 – прямой кишечник

Кроме того, Томский район имеет специфические черты накопления элементов в органах центральной нервной системы, в норме самой защищенной системе организма, что было ранее показано на примере организма человека (Игнатов, 2010). В зоне влияния Северного промышленного узла города Томска (д. Кижирова), мы видим, что антропогенное влияние на организм приводит к нарушению работы гематоэнцефалического барьера, и концентрированию элементов в головном и спинном мозге.

В организме животных, испытывающих постоянное техногенное воздействие от Северного промышленного узла г. Томска, накапливаются Cs, Ba, La в головном, и Cr, Fe, Cs, Hf, Sm в спинном мозге. В то время как органы центральной нервной системы млекопитающего из населенного пункта Верхнее Сеченово не содержат элементов с коэффициентом концентрации выше 1. Можно предположить, что антропогенное воздействие нарушает работу гематоэнцефалического барьера, препятствующего попаданию металлов в головной мозг. Данное предположение подтверждается и по результатам анализа

ИСП-МС, и сравнения элементного состава органов центральной нервной системы населенных пунктов Томского района с городом Экибастузом. Элементный состав биоматериалов, отобранных на территории города Экибастуза, свидетельствует об активном накоплении элементов, однако в значительной меньшей степени, чем в пробах из деревни Кижирово.

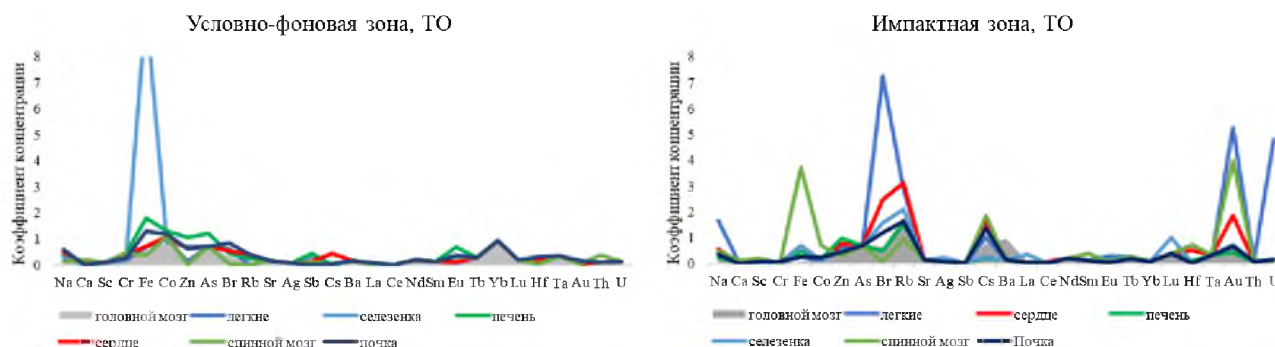


Рисунок 11. Распределение химических элементов в органах Свины домашней (*Sus scrofa domesticus*) коэффициент концентрации относительно среднего содержания в выборке, по результатам ИНАА

Прим.: ТО – Томская область, условно-фоновая зона – деревня Верхнее Сеченово, импактная зона – деревня Кижирово

Работа барьерных систем живого организма изменяется вследствие техногенеза. Усиленное антропогенное воздействие нарушает работу гематоэнцефалического и плацентарного барьеров, в результате чего данные системы начинают накапливают потенциально токсичные элементы. Органы же пищеварительной системы функционируют как мощный природный барьер, однако их работа также зависит от степени техногенного воздействия.

ПОЛОЖЕНИЕ 3. *Рассчитанный индекс токсичности увеличивается под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека. Расчет индекса токсичности элементов для здоровья населения согласно их содержанию в мышечной ткани млекопитающего при нормализации к почвам позволяет ранжировать территории по снижению показателя в следующем порядке:*

1. Для Cr **Забайкальский край > Павлодарская область > Республика Тыва > Томская область > Восточно-Казахстанская область;**
2. Для Zn, As, Sb, Ba **Забайкальский край > Павлодарская область > Восточно-Казахстанская область > Томская область > Республика Тыва.**

Поскольку база данных модели USEtox включает широкий спектр элементов (3000 органических соединений и 25 неорганических элементов-металлов), для анализа токсичности были выбраны условно-токсичные микроэлементы, входящие в базу данных модели USEtox и содержание, которых было проанализировано методом ИНАА в результате исследования: Cr, Zn, Sb, As, Ba. Данные элементы были выбраны для сравнительного анализа токсичности в связи с типом их воздействия на живой организм, так, все перечисленные

элементы, за исключением Ba способны вызывать мутации у млекопитающих (Chernuh and Baeva, 2004; Вишневецкий, В.Ю. Ледяева, 2012; Гусева, 2016). Выбранные элементы активно накапливаются в барьерных органах и тканях млекопитающего на всех изученных территориях. Пробы тканей пищеварительного тракта животного, отобранные на территории г. Экибастуза Павлодарской области, содержат высокие концентрации всех выбранных элементов, а в Томском районе только As. В депонирующей же системе, а именно в костной ткани выбранные элементы особенно интенсивно накапливаются в пробах из Забайкальского края, причем в пробах из села Газимурский завод Sr демонстрирует максимальный коэффициент концентрации, в этих же пробах активно накапливается Zn. Такие элементы как Ba, Sb аккумулируются в костной ткани, отобранной в поселке Тайна. В костном мозге Sb накапливается только в органах и тканях животного из села Уровские ключи, в то время как Sr аккумулируется во всех пробах костного мозга. Потенциальное токсическое воздействие рассчитано в рамках версии USEtox 2.02 и соответствующими ей методическими указаниями, с использованием результатов собственных исследований, по методике опубликованной ранее (Belyanovskaya et al., 2019), используя методику расчета характеристического коэффициента токсичности, описанную в документации модели (Fantke et al., 2017). Для данных элементов рассматривалось исключительное не канцерогенное токсическое воздействие ввиду неполноты данных по канцерогенности элементов.

Характеристический коэффициент токсичности (CF), который требуется для оценки воздействия на здоровье человека или воздействие на окружающую среду, обычно определяется как комбинация этих трех факторов (формула 1):

$$CF=FF \times EF \times XF \text{ (1)}$$

Формула охватывает два основных аспекта, связанных с поведением химических веществ в окружающей среде и их накоплением, и передачей в трофических уровнях (FF –фактор «судьбы» элемента в экосистемах и XF - фактор экспозиции) и связанных с воздействием человека или окружающей среды (EF - фактор эффекта).

Фактор экспозиции (XF) отражает уровень воздействия окружающей среды на потребление населением потенциально токсичных химических элементов с пищей. Таким образом, весьма логичным является тот факт, что именно Забайкальский край и Павлодарская область являются территориями с наивысшим эффективным потреблением вне зависимости от исследуемого элемента. Население этих территорий испытывает высокую антропогенную нагрузку от действующих в непосредственной близости от жилой зоны объектов добывающей промышленности.

Рассматривая потребление отдельных элементов, можно отметить, что хром и сурьма выделяются в ряду изученных элементов по наиболее высокому эффективному потреблению (величина фактора экспозиции), с исключением для Восточно-Казахстанской области, где на второе место по величине данного показателя выходит цинк. В поселке Путинцево Восточно-Казахстанской области наивысший фактор экспозиции отмечается для цинка, затем мышьяка, сурьмы,

хрома и бария. Описанная выше тенденция отражает не только биологическую доступность элементов, но и региональные геохимические особенности территории. Поселок Путинцево находится в близости от Малеевского рудника, элементами-примесями выбросов которого являются сурьма, цинк, мышьяк. Можно предположить, что схожие тенденции поступления элементов для исследуемых зон связаны с их степенью биологической доступности для организма, и отражает химизм элементов и активность их поступления в организм.

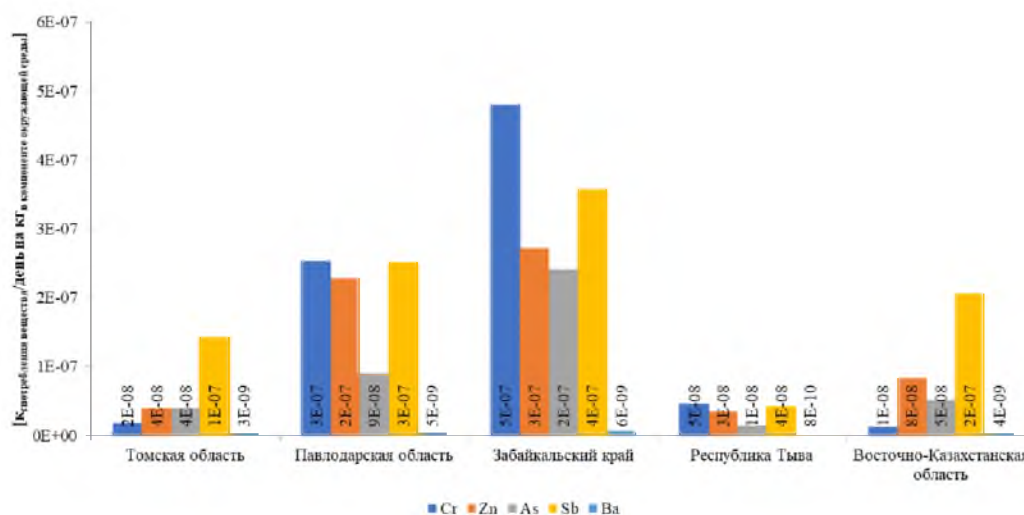


Рисунок 12. Фактор экспозиции, рассчитанный для Cr, Zn, As, Sb, Ba для исследованных территорий, воздействие через почвы, [кг_{потребления вещества}/день на кг_{в компоненте окружающей среды}]

Модифицированный фактор экспозиции был экстраполирован в расчеты характеристического коэффициента токсического воздействия, и по его результатам были построены сравнительные диаграммы (Рисунок 13).

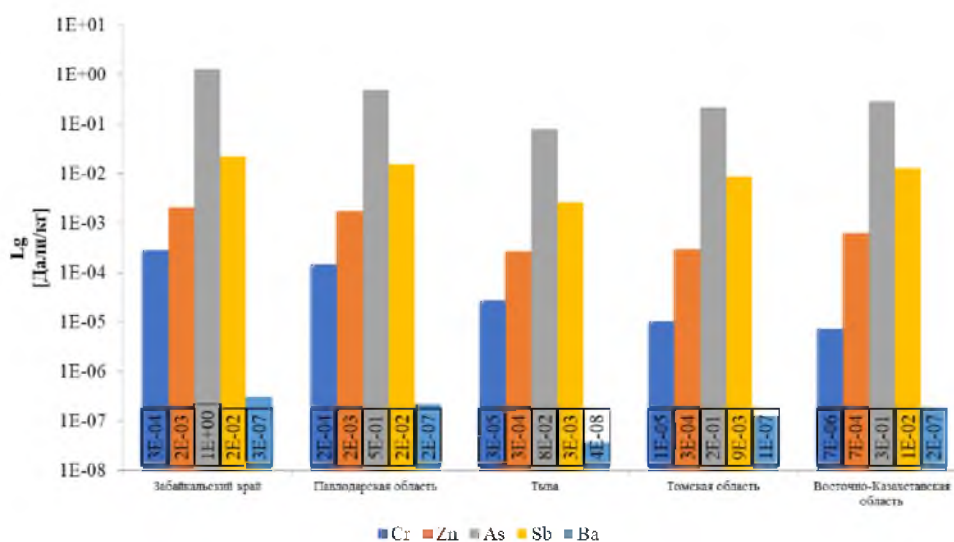


Рисунок 13. Характеристический коэффициент, рассчитанный для Cr, Zn, As, Sb, Ba для исследованных территорий, воздействие через почву, [Дали/кг]

Расчитанный с использованием модифицированного фактора экспозиции характеристический коэффициент токсичности отражает потенциальную опасность веществ для здоровья населения с учетом экологических особенностей каждого региона. Согласно проведенным расчетам можно отметить, что большинство элементов имеют наивысший уровень токсичности на территории населенных пунктов Забайкальского края. За исключением хрома минимальный риск для здоровья человека выбранные элементы представляют для жителей поселка Хову-Аксы Республики Тыва. Для большинства элементов ранжирование индекса токсичности для поступления с территории через почвы выглядит следующим образом: Забайкальский край > Павлодарская область > Восточно-Казахстанская область > Томская область > Тыва. Для хрома взаимоотношение меняется, на третье место по опасности для населения выходит Республика Тыва, а на последнее Восточно-Казахстанская область. Таким образом, результаты оценки токсичности элементов на разных исследуемых территориях согласуются с исследованиями, проведенными ранее, и показывают потенциальную токсичность элементов не только в зависимости от концентрации элементов в биоматериалах, но и размера территории и плотности населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. В условиях локальных территорий России и Казахстана в организме млекопитающих происходит концентрирование специфичных химических элементов и изменяются их соотношения, что может служить индикаторов геоэкологической обстановки района. Для организма Свины домашней, отобранных на территории города Экибастуза Павлодарской области характерно концентрирование таких элементов как Na, Zn, Rb, Ag, Sm, Lu, с их преимущественным аккумулярованием в органах пищеварительной и опорно-двигательной системы. Для Томского района характерно концентрирование Au, Br, с их концентрированием в органах дыхательной и кровеносной системы.
2. Независимо от региона в организме млекопитающих образуются устойчивые корреляционные связи элементов с хромом. Техногенные условия среды обитания формируют различные ассоциации данного элемента, для города Экибастуза Павлодарской области Республики Казахстан и населенных пунктов Томского района России – положительные, для поселений Забайкальского края – отрицательные.
3. В условиях повышенного антропогенного воздействия нарушается работа барьерных органов. Начинается аккумулярование химических элементов в головном мозге, плацентарной ткани и эмбрионах млекопитающих.
4. Модифицированный характеристический коэффициент токсичности позволяет ранжировать локальные территории России и Казахстана по степени токсичности отдельных элементов для здоровья населения. В целом, данный показатель характеризует поселения Забайкальского края, как зоны наиболее напряженной нагрузки для человека.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Беляновская, А.И. Элементный состав воды биологической как индикатор техногенеза / Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская, Н. П. Корогод, А. А. Хвощевская, Ю. Г. Копылова, Ю. С. Мазурова, Р. Ж. Муканова, Т. К. Туркбенов, М. И. Скрипник // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов., Т. 330 - № 2 - С. 214–223 - 2019.
2. Беляновская А.И. Влияние техногенеза на аккумуляцию химических элементов в плацентарном барьере жительниц Томской области / Н.В. Барановская, С.С. Станкевич, Б. Ларат, Н. Перри // Самарский научный вестник. 2019. №3 (28) – С. 25-30 – 2019

Публикации в зарубежных журналах, индексируемых базой данных Scopus и Web of Science

3. A. Belyanovskaya A regional approach for the calculation of characteristic toxicity factors using the USEtox model / B. Laratte, N. Perry, and N. Baranovskaya // *Sci. Total Environ.*, vol. 655, pp. 676–683, 2019.
4. A. Belyanovskaya Chemical composition of the small mammal reproductive system as an indicator of enterprise technogenic impact on the environment / N. Baranovskaya, V. Bezel, S. Mukhacheva, and M. Anufrieva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 1.
5. A. Belyanovskaya Elemental composition of biological water as an indicator of technogenesis / Rikhvanov, L.P., Baranovskaya, N.V., Korogod, N.P., (...), Skripnik, M.I., Belyanovskaya, A.I. [Элементный состав воды биологической как индикатор техногенеза] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering* 330(2), 2019 с. 214-223

Статьи, материалы конференций

6. Alexandra Belyanovskaya, Bertrand Laratte, Nicolas Perry, Natalia Baranovskaya Improvement of calculations of the total characterization factor in the USEtox model including a regional approach CEST 2019 The 16th International Conference on Environmental Science and Technology September 4-7, Rhodes, 2019, Greece;
7. Alexandra Belyanovskaya, Bertrand Laratte, Natalia Baranovskaya, Nicolas Perry (2018). The innovation of the human exposure factor estimation for LCA EcoBalance 2018 The 13th Biennial International Conference on EcoBalance October 9-12, 2018, Tokyo, Japan;
8. Беляновская А.И. Оценка содержания радиоактивных элементов в золе биологического материала женщин, проживающих на территориях, приравненных к районам Крайнего Севера/Беляновская А.И.//Всероссийская молодежная научная конференция им. Профессора М.К. Коровина «Творчество юных - шаг в успешное будущее» по теме «Арктика и её освоение»;
9. Беляновская А.И. Методика выделения воды из органов свиньи домашней для геохимических исследований/Беляновская А.И.//XX Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых,

посвященный 120-летию со дня основания Томского политехнического университета;

10. Беляновская А.И. Chemical Composition of the Placenta Biopsies as an Indicator of Enterprise Technogenic Impact on the Environment/Беляновская А.И.//VII Международная конференция по медицинской геологии;

11. Беляновская А.И. Микроминеральные фазы золы биоматериала млекопитающего территории Зыряновского района Республики Казахстан/Бахолдина А. Беляновская А.И.//XXIII Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященный 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина.