

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
Технологический университет Труа, Франция

*На правах рукописи*

Перминова Татьяна Анатольевна

**БРОМ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ И ОЦЕНКА  
ЕГО ТОКСИЧНОСТИ**

Специальность – 25.00.36 Геоэкология (науки о Земле)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

*Научный руководитель:*  
доктор биологических наук,  
доцент Барановская Н.В.  
*Научный консультант:*  
PhD Бертран ЛАРАТТ

Томск–Труа–2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЭКОЛОГО – ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БРОМА .....	12
1.1 Общая характеристика элемента.....	12
1.2 Воздействие брома на живые организмы.....	14
1.2.1 Токсичность.....	14
1.2.2 Бром и здоровье человека .....	16
1.3 Гигиенические нормативы.....	19
ГЛАВА 2. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БРОМА В ПРИРОДНО – ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМАХ.....	20
2.1 Содержание брома в гидросфере и атмосфере .....	23
2.2 О вариативности содержаний брома в литосфере.....	27
2.3 Бром в живых организмах .....	31
2.3.1 Бром в продуктах питания .....	34
2.4 Общие закономерности накопления и распределения брома в компонентах биосферы ....	38
ГЛАВА 3. СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ .....	40
ГЛАВА 4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	51
4.1 Исходный материал, методика пробоотбора и пробоподготовки .....	51
4.2 Аналитические методы лабораторных исследований .....	58
4.2.1 Инструментальный нейтронно-активационный анализ.....	58
4.2.2 Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.....	59
4.2.3 Рентгенофлуоресцентный анализ.....	60
4.2.4 Сканирующая электронная микроскопия.....	60
4.3 Методика обработки данных.....	61
4.4 Методика оценки токсичности брома с помощью модели USEtox.....	62
ГЛАВА 5. КРАТКАЯ ПРИРОДНО–КЛИМАТИЧЕСКАЯ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ .....	66
ГЛАВА 6. ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БРОМА В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ .....	74
6.1 Особенности накопления и распределения брома в абиотических компонентах.....	76
6.2 Особенности накопления и распределения брома в биотических компонентах .....	84
ГЛАВА 7. БРОМ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА (НА ПРИМЕРЕ ТОМСКОГО РАЙОНА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ).....	102
7.1 Бром в абиотических компонентах природной среды .....	104

7.2 Бром в биотических компонентах природной среды.....	110
7.3 Геохимическая характеристика природных сред в районах расположения предприятий нефтеперерабатывающего комплекса .....	121
<b>ГЛАВА 8. ОЦЕНКА ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ БРОМА НА ЭКОСИСТЕМЫ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА ПОСРЕДСТВОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....</b>	<b>128</b>
8.1 Применение модели для оценки токсичности и экотоксичности брома в окружающей среде различных ландшафтно – географических зон.....	131
8.2 Применение модели для оценки токсичности и экотоксичности брома в почвах Томской области.....	133
8.2.1 Оценка взаимосвязи между токсичностью брома в почвах и уровнем заболеваемости населения Томской области.....	141
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>148</b>
<b>СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ .....</b>	<b>149</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>152</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>180</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Бром, в противоположность другим, даже менее распространенным химическим элементам, до сих пор остается одним из наименее изученных (*Памяти первых...*, 1994). Работы, затрагивающие вопросы его накопления и миграции в окружающей среде, выполнялись рядом исследователей и показали неоднозначное поведение и высокие индикаторные свойства элемента (*Селиванов, 1939; Виноградов, 1939; Сулин, 1946; Кротова, 1956; Красинцева, 1968; Розен, 1970; Перельман, 1979; Полянский, 1980; Кабата-Пендиас, 1989; Иванов, 1996; Конарбаева, 2008 и др.*). Большая часть имеющихся публикаций посвящены именно рассмотрению природных особенностей поведения брома в окружающей среде, в то время как все более пристального внимания требуют исследования по техногеохимии элемента ввиду его широкого использования в многочисленных сферах человеческой деятельности: сельское хозяйство, медицина, химическая, пищевая, фармацевтическая промышленности и мн. др. (*Полянский, 1980; Ксензенко, 1995; Гринвуд, 2008; Yoffe et al., 2013*).

Бром является одним из важнейших участников формирования пищевой цепочки: атмосфера – почва – природные воды – растения – животные – человек (*Конарбаева, 2008*). А формирующийся «симбиоз» природно – антропогенных источников элемента, обуславливающий комплексность и многофакторность его поступления в окружающую среду, несомненно, оказывает влияние на особенности накопления и распределения галогена, как в каждом отдельном звене вышеописанной пищевой цепи, так и в ее совокупности.

Томская область представляет особой интерес с точки зрения изучения брома ввиду присутствия на данной территории большого количества потенциальных природных (месторождения нефти и газа, торфа, угля, подземных вод, в т. ч. йод–бромных и др.) и антропогенных источников элемента. Последние, сосредоточены, главным образом, в Томском районе области, а именно в зоне Северного промышленного узла – СПУ (*Экология ..., 1994*). Поступление элемента в окружающую среду области может быть также связано с выбросами автотранспорта (*Shah et al., 1970; Block et al., 1978; Begak et al., 2001*) и авиатранспорта (*Zikovsky, 1986*) – в пределах Томского района области находится аэропорт «Богашево», являющийся основным действующим международным аэропортом федерального значения.

Вместе с тем актуальным является вопрос выбора наилучшего способа оценки состояния окружающей среды, позволяющего оценить токсическое воздействие как для экосистем, так и для здоровья человека. Связано это с тем фактом, что бром может быть чрезвычайно токсичным (*Groff, 1955; Voss, 1961; Иванов, 1996; Метелев, 1971; Грушко, 1979; Nazer et al., 1982; Филов, 1988; WHO, 1988; IUCLID, 2000; Kabata-Pendias, 2011, Арбузова и др, 2013 и мн.др.*), оказывая отрицательное воздействие на важнейшие физиологические функции живых организмов и участвуя в развитии и образовании некоторых видов заболеваний (*Pehrsson et al., 1983; Lin et al.,*

1985; Sarmani et al., 1990; Bumbalova et al., 1991; Ehmman et al., 1996; Pavelka, 2002 и мн.др.). Бром относится к элементам, который чаще других приводит к повышенному риску для здоровья человека (Valdes, 2012), с ним связано, как минимум, 11 различных патологий (Авцын, 1991).

Доступность значительного количества современных способов оценки состояния окружающей среды (Perminova et al., 2016) предоставляет возможным осуществление комплексного анализа с использованием различных методов, подходов, концепций и моделей, позволяющих прогнозирование негативных последствий на живые организмы, в том числе на здоровье человека. С точки зрения изучения токсичности химических элементов, методы экологического моделирования, приобретают все более широкое распространение ввиду ряда достоинств и представляют серьезный интерес в рамках геоэкологических исследований территорий (Rosenbaum et al., 2008).

Среди существующих экологических моделей, позволяющих оценивать токсическое воздействие на экосистемы и здоровье человека, отдельного внимания заслуживает модель USEtox, разработанная Обществом экологической токсикологии и химии (SETAC) в 2010 г. и рекомендованная для использования мировым научным сообществом: UNEP, EPA, Европейская комиссия и др. (Rosenbaum et al., 2008, 2011; Henderson et al., 2011; Westh et al., 2015). Одним из преимуществ модели является учет многофакторности воздействия химических элементов: принимается во внимание их поступление ингаляционным и пероральным путями. Другим серьезным достоинством, представляющим уникальность модели и актуальность ее использования в контексте экологических исследований, является учет специфических ландшафтно–географических и климатических особенностей территории.

Для расчета токсического воздействия химических элементов на экосистемы и здоровье человека необходимо знание их характеристических коэффициентов (ХК) и массы в компонентах природной среды. Если данные по количественному содержанию элемента являются результатами аналитических исследований, то расчет ХК проводится по методике, предложенной в модели. ХК основаны на физико-химических свойствах элементов, особенностях их поведения в окружающей среде (например, скорость деградации в воздухе), а также на данных токсикологических исследований, полученных в опытах на экспериментальных животных и экстраполированных на человека, и играют значительную роль в геоэкологической оценке территории. На сегодняшний день база данных модели USEtox включает информацию по ХК для более, чем 3000 органических соединений и 25 неорганических элементов (As, Cr, Co и др.). Однако, ХК по бромю отсутствует, что определяет актуальность данных исследований.

**Цель работы** – установление особенностей накопления и распределения брома в компонентах природной среды Томской области, и оценка его токсичности для экосистем и человека, на основе рассчитанных характеристических коэффициентов, согласно модели USEtox. Для ее решения поставлены следующие **задачи**:

- Провести литературный обзор по геоэкологическим аспектам накопления и распределения брома в природно – техногенных ландшафтах;
- Определить количественное содержание элемента в различных компонентах природной среды на территории Томской области и сравнить полученные данные с другими регионами России и зарубежья, а также литературными показателями;
- Провести анализ пространственно – временного распределения брома на исследуемой территории с обозначением локальных участков, характеризующихся повышенными содержаниями элемента, обусловленными природно – техногенными факторами;
- Провести ранжирование территории Томской области в соответствии с минимально – максимальным концентрированием элемента в компонентах природной среды;
- Установить индикаторные показатели отношений брома с химическими элементами в районах расположения промышленных предприятий;
- Выполнить расчет характеристических коэффициентов токсичности брома для компонентов природной среды в целях последующего их введения и использования в модели USEtox;
- Оценить токсическое воздействие брома для экосистем и человека на примере почв Томской области, с учетом ее ландшафтно-географических характеристик, и провести сопоставление с данными по заболеваемости населения Томской области;
- Провести ранжирование территории региона по степени опасности для экосистем и здоровья населения.

**Основные защищаемые положения:**

1. В рамках изучения круговорота брома в природно – техногенных системах установлено, что спецификой Томской области является существенное накопление и крайне неоднородное распределение элемента в наземных растениях и животных, а также в организме человека. Из абиотических компонентов, значимо более высокие содержания брома отмечаются в почвах Бакчарского и Кожевниковского районов относительно среднего по области, что не находит отражение в других объектах исследования этих территорий.
2. Специфика накопления брома в компонентах природных сред зависит от характера и комплексности природно-техногенного воздействия и проявляется в ассоциативных

взаимосвязях элемента, неравномерности его концентрирования во времени, а также снижении содержания по мере удаления от зоны техногенного воздействия.

3. По результатам впервые рассчитанного характеристического коэффициента токсичности брома установлено, что элемент является более токсичным для экосистем, чем для человека. Ранжирование административных районов Томской области по степени токсического воздействия брома, с учетом ее ландшафтно-географических характеристик, показывает, что наибольшая опасность, обусловленная содержанием брома в почвах, характерна для здоровья жителей Бакчарского района области и для пресноводных экосистем Томского района, при минимальном вкладе брома в общий показатель токсичности.

**Фактический материал и методы исследований.** В основу диссертационной работы положены результаты исследований, проводимых лично автором, а также совместно с сотрудниками кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. В работе также рассмотрен и использован материал, предоставленный коллегами–сотрудниками университетов и институтов г. Томска (Томский государственный университет, Сибирский государственный медицинский университет, Научно-исследовательский институт фармакологии СО РАМН); г. Павлодара (Павлодарский педагогический институт); г. Новороссийска (Институт геохимии биосферы, Южный федеральный университет); г. Улан–Удэ (Бурятский государственный университет) и др.

В рамках работы рассмотрено содержание брома в 2709 пробах. Из них 408 проб почвы, 19 проб углей, 36 проб донных отложений, 8 проб питьевых вод, 317 проб солевых отложений (накись питьевых вод) и 34 пробы продуктов питания, а также 1887 проб живого вещества, включая органы и ткани человека, некоторые виды растительности и млекопитающих. Основная территория пробоотбора – Томская область, для проведения сравнительного анализа рассматривались данные, полученные по другим регионам России и зарубежья.

Для количественного определения брома в компонентах природной среды использовались следующие методы: инструментальный нейтронно–активационный анализ (ИНАА), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Отдельные пробы биоматериалов изучались с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Все отобранные материалы анализировались в аккредитованных лабораториях по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов сравнения. Достоверность анализов подтверждалась контрольными определениями на разных средах, выполнялся внутренний контроль.

**Достоверность защищаемых положений** обеспечена статистически значимым количеством проб, проанализированных современными высокочувствительными

аттестованными аналитическими методами (ИНАА, ICP–MS, рентгенофлуоресцентный анализ, сканирующая электронная микроскопия) в аккредитованных лабораториях, а также глубиной проработки фактического материала с использованием современных методов статистической обработки и литературы по теме исследования.

**Научная новизна.** Впервые проведен комплексный всесторонний анализ по особенностям накопления брома в значительном количестве компонентов природной среды. Рассмотрены особенности пространственно–временного распределения элемента на территории Томской области в пределах ее различных природно – антропогенных условий.

Впервые рассчитаны характеристические коэффициенты токсичности брома для компонентов природной среды, в целях последующего их введения и использования в модели USEtox. Изучено токсическое воздействие брома на экосистемы и здоровье человека на основе рассчитанных характеристических коэффициентов токсичности и результатов по концентрированию элемента в почвах, с учетом ландшафтно – географических особенностей Томской области. Проведено ранжирование территории Томской области по соответствующей опасности для экосистем и здоровья человека.

**Практическая значимость.** По результатам исследования построены геохимические карты распределения брома в различных компонентах природной среды, проведено дифференцирование районов Томской области по уровням концентрирования брома в окружающей среде и определены районы области, в природных средах которых отмечаются повышенные содержания элемента, что может являться полезным при проведении геоэкологического мониторинга территории.

Получены данные по характеристическому коэффициенту токсичности брома, ранее не включенного в модель USEtox. Полученные в рамках модели результаты по Томской области, как отдельной ландшафтно – географической зоны, могут быть использованы в будущем для проведения геоэкологических исследований, с целью изучения токсичности химических элементов и связанной с ними опасности для экосистем и здоровья человека.

Материалы, полученные в процессе выполнения работы, были использованы при проведении лекционных и практических занятий по курсу «Introduction to Environmental Science and Engineering» в Технологическом Университете Труа (Франция) для подготовки инженеров, а также могут быть использованы в курсах «Экология», «Геохимия живого вещества» и «Медицинская геология» для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Экология и природопользование» на кафедре геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.



**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, 2011–2013; 2015–2017); «Экология Южной Сибири и сопредельных территорий» (г. Абакан, 2012); Международной научно–практической конференции «Теоретические и прикладные вопросы науки и образования (г. Тамбов, 2015); II Всероссийской научной конференции «Малышевские чтения» (г. Старый Оскол, 2015); IX Международной Биогеохимической школе «Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии» (г. Барнаул, 2015), Международной конференции «Ecodesign» (г. Токио, Япония, 2015), Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека (г. Томск, 2016); Международной конференции «The International Society for Ecological Modelling Global Conference 2016» (г. Тоусон, США, 2016).

Кроме того, результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах на кафедре ГЭГХ ТПУ (г. Томск, Россия), в центре по изучению окружающей среды и устойчивому развитию Технологического университета Труа (г. Труа, Франция), а также на кафедре гидрологии и геохимии университета Страсбурга (г. Страсбург, Франция).

Отдельные результаты работы рассматривались и обсуждались в рамках участия в научной летней школе “Toxicology and Environmental Health” (г. Утрехт, Нидерланды, 2015), а также «USEtox summer school» (г. Копенгаген, Дания, 2016).

**Публикации.** Основное содержание и научные результаты диссертационной работы опубликованы в 20 статьях и тезисах докладов, в том числе 2 статьи – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и 1 статья на английском языке в журнале с ИФ 2,9, индексируемом в базе данных Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы и приложения, изложенных на 182 страницах машинописного текста. Она включает 78 рисунков и 33 таблицы. Список литературы содержит 354 источника, 127 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** рассмотрены эколого – геохимические особенности брома, его основные физико–химические свойства, воздействие на живые организмы, а также гигиенические нормативы по элементу. Во **второй главе** представлен расширенный обзор литературы по бромю, рассмотрены уровни его накопления в компонентах природной среды, основные области применения элемента и его соединений. **Третья глава**

посвящена анализу существующих на сегодняшний день способов оценки экологического состояния окружающей среды. **Четвертая глава** содержит сведения о методике проведения исследований, способах отбора проб, их последующей подготовке, методах анализа, приемах математической обработки данных, а также методических основах модели USEtox. В **пятой главе** рассматривается краткая природно-климатическая и геоэкологическая характеристика территории Томской области. **Шестая глава** посвящена особенностям накопления и распределения брома в биотических и абиотических компонентах природной среды Томской области. Проведен анализ уровней накопления брома в компонентах природной среды Томской области в сравнении с другими территориями Российской Федерации и зарубежья. В **седьмой главе** представлены особенности распределения брома в условиях техногенеза, на примере Томского района области. Проведен анализ изменения содержания элемента с годами. Изучена геохимическая специфика компонентов природной среды в районах расположения нефтеперерабатывающих предприятий, рассмотрены индикаторные показатели отношений брома с другими химическими элементами. В **восьмой главе** рассматривается оценка токсического воздействия брома на состояние экосистем и здоровье человека с помощью экологической модели USEtox. Проведен анализ взаимосвязей между токсичностью брома в почвенных покровах и уровнем заболеваемости населения Томской области. В **заключении** рассматриваются основные результаты и выводы по диссертационной работе.

**Личный вклад автора** заключается в отборе и подготовке 266 проб. Пробоотбор осуществлялся на территории Томской области (почвы, питьевая вода, накипь питьевых вод, волосы детей, кровь жителей, микроорганизмы минеральных источников, растительность, продукты питания), в регионе Гранд-Эст во Франции (почва, питьевая вода, листья тополя), а также в Байкальском регионе (микроорганизмы минеральных источников). Кроме того, автором, также был обобщен дополнительный материал, включающий 2433 образцов.

Автором лично проведена статистическая обработка всех данных, дана интерпретация полученных результатов и сформулированы защищаемые положения. Автором проводился расчет характеристических коэффициентов токсичности для брома, а также при совместной работе с авторами модели (P. Fantke, O. Jolliet), проводилось введение Томской области в модель USEtox, как отдельно ландшафтно-географической зоны. Доля участия автора в совместных публикациях пропорциональна долям остальных авторов.

**Благодарности.** Автор выражает огромную благодарность научному руководителю, доктору биологических наук, профессору кафедры ГЭГХ ТПУ Барановской Наталье Владимировне, а также научному консультанту, PhD Бертрану Ларатту за научное сопровождение, всестороннюю поддержку, понимание, мотивацию и помощь на всех этапах

реализации работы. Особую благодарность автор выражает доктору геолого-минералогических наук, профессору кафедры ГЭГХ Рихванову Леониду Петровичу за ценные советы, рекомендации и всестороннюю помощь.

Автор признателен за помощь всем сотрудникам кафедры ГЭГХ ТПУ, а также сотрудникам Технологического университета Труа, Франция. За ценные советы и/или предоставление материала, автор выражает отдельную признательность профессору, д.г.–м.н. Е. Г. Язикову, профессору, д.г.–м.н. С. И. Арбузову, доценту, к.г.–м.н. А. М. Межибор, доценту, к.г.–м.н. Л. В. Жорняк, доценту, к.г.–м.н. И. С. Соболеву, старшему преподавателю, к.г.–м.н. Д. В. Наркович, старшему преподавателю, к.г.–м.н. А. Р. Ялалтдиновой, старшему преподавателю, к.г.–м.н. Б. Р. Соктоеву, старшему преподавателю, к.г.–м.н. Е. А. Филимоненко, к.г.–м.н. Е. В. Черненькой, старшему преподавателю А. Ю. Иванову. Автор глубоко благодарен исполнителям аналитических исследований: с.н.с А. Ф. Судыко, Л. В. Богутской, Г. А. Бабченко, С.С. Ильенку, Н. В. Федюниной. Автор также благодарит директора института почвоведения и агрохимии СО РАН, д.б.н. А. И. Сысо и сотрудников института за теплый прием, а также ведущего инженера В.В. Демина за помощь в осуществлении аналитических исследований. Автор признателен всем сотрудникам лаборатории гидрологии и геохимии университета Страсбурга за ценные советы. Отдельно автор хотел бы поблагодарить П. Фантке, Н. Мюллер, О. Жоуле за активную помощь в работе с моделью USEtox, а также к.г.н. Н.В. Сирину за совместное сотрудничество и Ф. Братека за терпение, помощь и поддержку.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Технологического университета Труа (г. Труа, Франция); мобильности молодых ученых, предоставленной Посольством Франции в России (стипендия им. В.И. Вернадского для аспирантов); академической мобильности ТПУ «Плюс»; а также гранта президента РФ для обучения за рубежом (2016–2017).

## ГЛАВА 1. ЭКОЛОГО – ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БРОМА

### 1.1 Общая характеристика элемента

Бром – типичный рассеянный элемент, чем обусловлена «всюдность» его распространения и присутствие во всех компонентах окружающей среды. Ввиду высокой химической активности, элемент подвижен в любой геохимической обстановке, легко мигрирует в виде растворимых соединений, редко образуя твердые минеральные формы (Перельман, 1989). По главным геохимическим свойствам Br относится к атмо-, био- и гидрофильным элементам, а по главным минералого-геохимическим особенностям – к литофильным (Иванов, 1996). Основными геохимическими барьерами являются органогенный и испарительный (Алексеев, 2000; Четко, 2008).

В периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева, бром – Br (лат. *Bromum*) имеет атомный номер 35 и атомную массу 79,904. Он относится к группе галогенов, которая помимо самого элемента включает также фтор, хлор, йод, радиоактивный астатин и теллурин (рисунок 1.1). При нормальных условиях представляет собой тяжелую (плотность – 3,102 г/см<sup>3</sup> при 25°C) красно-бурюю жидкость с резким неприятным запахом. Бром – одно из двух простых веществ и единственный из неметаллов, являющийся жидким при комнатной температуре.

Периоды	Группы																	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
1	<sup>1</sup> H																	<sup>2</sup> He
2	<sup>3</sup> Li	<sup>4</sup> Be											<sup>5</sup> B	<sup>6</sup> C	<sup>7</sup> N	<sup>8</sup> O	<sup>9</sup> F	<sup>10</sup> Ne
3	<sup>11</sup> Na	<sup>12</sup> Mg											<sup>13</sup> Al	<sup>14</sup> Si	<sup>15</sup> P	<sup>16</sup> S	<sup>17</sup> Cl	<sup>18</sup> Ar
4	<sup>19</sup> K	<sup>20</sup> Ca	<sup>21</sup> Sc	<sup>22</sup> Ti	<sup>23</sup> V	<sup>24</sup> Cr	<sup>25</sup> Mn	<sup>26</sup> Fe	<sup>27</sup> Co	<sup>28</sup> Ni	<sup>29</sup> Cu	<sup>30</sup> Zn	<sup>31</sup> Ga	<sup>32</sup> Ge	<sup>33</sup> As	<sup>34</sup> Se	<sup>35</sup> Br	<sup>36</sup> Kr
5	<sup>37</sup> Rb	<sup>38</sup> Sr	<sup>39</sup> Y	<sup>40</sup> Zr	<sup>41</sup> Nb	<sup>42</sup> Mo	<sup>43</sup> Tc	<sup>44</sup> Ru	<sup>45</sup> Rh	<sup>46</sup> Pd	<sup>47</sup> Ag	<sup>48</sup> Cd	<sup>49</sup> In	<sup>50</sup> Sn	<sup>51</sup> Sb	<sup>52</sup> Te	<sup>53</sup> I	<sup>54</sup> Xe
6	<sup>55</sup> Cs	<sup>56</sup> Ba	La-Lu	<sup>72</sup> Hf	<sup>73</sup> Ta	<sup>74</sup> W	<sup>75</sup> Re	<sup>76</sup> Os	<sup>77</sup> Ir	<sup>78</sup> Pt	<sup>79</sup> Au	<sup>80</sup> Hg	<sup>81</sup> Tl	<sup>82</sup> Pb	<sup>83</sup> Bi	<sup>84</sup> Po	<sup>85</sup> At	<sup>86</sup> Rn
7	<sup>87</sup> Fr	<sup>88</sup> Ra	Ac-Lr	<sup>104</sup> Rf	<sup>105</sup> Db	<sup>106</sup> Sg	<sup>107</sup> Bh	<sup>108</sup> Hs	<sup>109</sup> Mt	<sup>110</sup> Ds	<sup>111</sup> Rg	<sup>112</sup> Cn	<sup>113</sup> Uut	<sup>114</sup> Fl	<sup>115</sup> Uup	<sup>116</sup> Lv	<sup>117</sup> Ts	<sup>118</sup> Uuo

**Рисунок 1.1** – Расположение брома в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева с указанием его «соседей» по группам и рядам, где серым цветом обозначены элементы группы галогенов, красным цветом показаны химические элементы – «соседи» брома (рисунок построен автором с использованием таблицы Д.И. Менделеева, а также данных А.И.Перельмана, 1979)

При температуре  $-7,25^{\circ}\text{C}$  затвердевает, образуя красно-коричневые кристаллы игольчатой формы, при кипении ( $t$  кипения  $+ 59,5^{\circ}\text{C}$ ) превращается из жидкости в буро-коричневые пары (*Химическая энциклопедия, 1988*). В свободном состоянии элемент имеет двухатомное строение –  $\text{Br}_2$  (в парах обнаружены молекулы  $\text{Br}_4$ ), обусловленное высокой летучестью и низкой энтальпией испарения (*Гринвуд, Эршино, 2008*).

Бром имеет два природных изотопа:  $^{79}\text{Br}$  и  $^{81}\text{Br}$ , процентное содержание которых практически одинаково: 50,57% и 49,43% соответственно (*Полянский, 1980*). Однако помимо этого, известны и многочисленные радиоактивные изотопы элемента, полученные искусственным путем с массовыми числами от 68 до 97. При этом, практически все они являются короткоживущими, за исключением  $^{77}\text{Br}$  и  $^{82}\text{Br}$ , периоды полураспада которых составляют 57 ч и 35,3 ч соответственно (*Audi et al., 2003; Eggenkamp, 2014*). Галоген присутствует также в цепочках радиоактивного распада, при этом из радиоактивных изотопов брома образуется криптон и другие элементы по следующей схеме:  $\text{Br}^{82} - \text{Kr}^{82} - \text{Rb}^{82} - \text{Sr}^{82} - \text{Y}^{82} - \text{Zr}^{82}$  (*Гусев, Дмитриев, 1978*). Подобного рода цепочки отмечают практически для всех радиоактивных изотопов брома.

На внешнем электронном уровне атома брома находятся семь электронов ( $3d^{10}4s^2 4p^5$ ), до устойчивой конфигурации слоя ему не хватает лишь одного электрона, который он способен легко присоединять. Благодаря наличию незаполненного р-подуровня, Br в соединениях может иметь переменную валентность: **-1** (характерна для бромидов, например,  $\text{KBr}$ ), **+ 1** (в гипобромидах,  $\text{NaBrO}$ ), **+3** (в бромитах,  $\text{NaBrO}_2$ ), **+5** (в броматах,  $\text{KBrO}_3$ ), **+7** (в перброматах,  $\text{NaBrO}_4$ ).

Бром, как и другие элементы подгруппы галогенов, характеризуется высокой химической активностью, что обусловлено стремлением атомов перейти в отрицательные однозарядные ионы (*Реми, 1963*). По своей реакционной способности элемент занимает промежуточное положение между хлором и йодом, т.е. он более реакционноспособен, чем йод, но менее, чем хлор.

При обычных условиях бром умеренно растворяется в воде – 3,5г/100 г воды при  $20^{\circ}\text{C}$  (*Биколова, Ишмуратова, 1999*) и в небольшой степени подвергается дисмутации («бромная вода»). Растворимость элемента повышается в присутствии бромидов и хлоридов и снижается в присутствии сульфатов (*Лидин, 2000*). В водной среде бром способен окислять нитриты до нитратов, серу и сульфиты до серной кислоты, аммиак до азота, а иодиды до свободного йода. Так как бром является сильным окислителем, он активно реагирует почти со всеми неметаллами и многими металлами. В обычных условиях элемент прямо не реагирует с  $\text{O}_2$ , N и C; реакция с водородом происходит при повышенных температурах с образованием бромоводорода. В

водных растворах бромидов  $\text{Br}^-$  окисляется  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  до  $\text{Br}_2$  (*Химическая энциклопедия, 1988*).

С другими элементами группы галогенов бром образует неустойчивые, отличающиеся высокой химической активностью соединения:  $\text{BrF}_3$ ,  $\text{BrF}_5$ ,  $\text{BrCl}$  и  $\text{BrI}$ . Стремление заряжаться отрицательно определяет особенность галогенов, заключающуюся в вытеснении друг друга из соединений. Как следствие, элементарный фтор вытесняет  $\text{Cl}$ ,  $\text{Br}$  и  $\text{I}$  из их соединений с металлами, хлор – только соединения двух последних, а бром – только йод. Однако, из кислородосодержащих кислот и их солей, в которых галогены заряжены положительно, йод вытесняет хлор и бром, а бром – хлор (*Реми, 1963*).

## **1.2 Воздействие брома на живые организмы**

Несмотря на то, что бром является жизненно необходимым элементом, в избыточных количествах он способен оказывать вредное воздействие на все живые организмы. Многочисленные данные свидетельствуют о токсических эффектах брома и его специфичной роли в образовании и развитии некоторых видов заболеваний.

### **1.2.1 Токсичность**

Бром может быть крайне токсичным для растений, поскольку способен замещать необходимый для них хлор, а также влиять на изменение проницаемости клеточных мембран (*Kabata-Pendias, 2011; Nazer et al., 1982*). Токсичность элемента для растений проявляется в хлорозе, т.е. нарушении образования хлорофилла и снижения активности фотосинтеза, с последующим некрозом листьев. Широко известно использование цитрусовых, как индикаторов токсичности брома: снижение темпов их роста положительно коррелирует с содержанием водорастворимого брома в почвах. Концентрация брома в поверхностном слое почвы, составляющая 20 мг/кг, считается предельной в отношении фитотоксичности (*Кабата-Пендиас, 1989*).

Изучение влияния брома на гидробионтов показало, что дозы 400 мг/л при экспозиции в течении 30 мин – 1ч 10 мин, 100 мг/л через 1–3 ч или 20 мг/л – в период от 15 до 96 ч являются смертельными для рыб (*Метелев, 1971*). Караси погибают при концентрации брома в 20 мг/л, для хлореллы эта концентрация составляет 0,18 мг/л, а для кольчатых червей – 0,14 мг/л (*Грушко, 1979*).

Токсичность брома изучалась также рядом исследователей и на подопытных животных. Определение острой токсичности брома показало, что среднесмертельная доза  $\text{LD}_{50}$  при введении в желудок составляет: для мышей – 3100–7000 мг/кг (*Groff, 1955; Voss, 1961; WHO, 1988; IUCLID, 2000*), для крыс – 2600–3500 мг/кг (*Smith, 1925; WHO, 1988; IUCLID, 2000*), для кроликов – 2500–

4600 мг/кг; для морских свинок – 5500 мг/кг (*WHO, 1988; IUCLID, 2000*). Средняя летальная концентрация ЛК<sub>50</sub> равна 2900 мг/м<sup>3</sup> для мышей и 2700 мг/м<sup>3</sup> – для крыс. При концентрации 1200–200 мг/м<sup>3</sup> пары брома смертельны для кошек, кроликов и морских свинок. По влиянию на сердечно-сосудистую и эндокринную системы, пороговая концентрация брома составляет 50 мг/м<sup>3</sup>, а по влиянию на сперматогенез – 100 мг/м<sup>3</sup> (*Иванов, 1996*).

Результаты кратковременной токсичности показывают, что при поступлении 99,5% раствора бромида натрия в количестве 19200 мг/кг в течении 4 недель, у крыс отмечается отсутствие двигательной координации задних конечностей (*van Logten, 1973*). Однако, при поступлении бромида натрия в том же количестве при низко хлоридной диете (уменьшение содержание хлора с 11 г/кг до 3 г/кг) наблюдается летальный эффект в течении 12 дней (*Kroes et al., 1974*).

Результаты, полученные в хроническом эксперименте свидетельствуют о важных клинических и физических симптомах отравления бромом: снижение массы тела, нарушения функций эндокринной, сердечно-сосудистой и нервной систем у крыс, и нарушения в дыхательной системе у кроликов при концентрации 12,4 мг/м<sup>3</sup>. Трехмесячное введение брома в желудок крыс, вызвало изменения углеводного и белкового обмена, увеличение сахара в крови и снижение содержания аскорбиновой кислоты в надпочечниках. Почти у половины подопытных животных отмечались очаговые облысения. Введение крысам бромированного растительного масла с кормом в течение 1–6 месяцев привело к перерождению печени и дегенеративно-некротическим изменениям в миокарде (*Филов, 1988*).

Помимо прямого токсического воздействия, для брома характерны также и отдалённые эффекты, затрагивающие основополагающие функции живых организмов, в первую очередь, репродуктивную (*Арбузова и др., 2013*). Согласно опытам *Van Leeuwen (1983)*, полное бесплодие наблюдалось у группы крыс, получающих питание с содержанием 19200 мг/кг бромида натрия; у группы с дозой 4800 мг/кг наблюдалось снижение рождаемости и жизнеспособности потомства; у групп с дозой бромида натрия 0,75 мг/кг и 300 мг/кг не наблюдалось никаких изменений. Кроме того, в работе *Canton (1983)* отмечается уменьшение новорожденной молоди рыб при экспозиции бромом в течении 124 суток дозой 7,8–78 мг/л. На данный факт стоит обратить особое внимание, так как он свидетельствует о том, что бром является экологически токсичным элементом, поскольку создает угрозу не только для отдельных организмов, а для целых популяций и поколений.

Для человека бром является токсичным при любом способе его попадания в организм. Особое внимание стоит обратить на ингаляционный путь попадания элемента ввиду того факта, что бром быстро абсорбируется легкими. *Могош (1984)* отмечает, что эффекты от попадающего

воздушно-капельным путем брома могут быть следующими: удушье, отмечающееся при концентрациях 11–23 мг/м<sup>3</sup>; тяжелые токсические явления – при 30-60 мг/м<sup>3</sup> и смерть – при 220 мг/м<sup>3</sup>. У рабочих, занятых на производстве элементарного брома и его соединений, отмечаются нарушения углеводного обмена, функций почек, а также снижение активности щитовидной железы (*Шаповалов, 1974; Шаповалов, 1974а*).

### **1.2.2 Бром и здоровье человека**

Бром, наряду с никелем, ванадием, алюминием, мышьяком и кремнием, относится к элементам, который чаще других приводит к повышенному риску для здоровья человека (*Valdes, 2012*). Являясь следовым элементом, он может играть важную роль в появлении и развитии некоторых видов заболеваний. Согласно *Авцыну (1991)* с бромом связано 11 различных патологий, что характеризует элемент, как обладающий высокой патологичностью (П=4).

*Lin et al. (1985)*, как и *Sarmani et al. (1990)* утверждают о том, что бром может иметь важное значение в образовании мочекаменной болезни. Повышенные содержания элемента были обнаружены в сердечной ткани больных уреимией (*Pehrsson et al., 1983*), дилатационной кардиомиопатией (*Bumbalova et al., 1991*), серповидноклеточной анемией, а также в злокачественной ткани молочной железы (*Ehmann et al., 1996*). Высокие концентрации брома наблюдаются в мозге (75% кора головного мозга), волосах и ногтях больных болезнью Альцгеймера (*Ehmann et al., 1996*). Методами корреляционного анализа была установлена положительная связь рака печени с содержанием брома в водах (*Litch, 2005*), кожных заболеваний с содержанием брома в накипи питьевых вод, а отрицательная – с болезнями пищеварительной системы и системы кровообращения (*Арынова, 2016*).

Кроме того, многочисленные данные, приводимые как российскими, так и зарубежными исследователями, демонстрируют возможную связь между патологиями щитовидной железы и бромом. Согласно *Vobecky et al. (1996)* нарастающий дефицит йода, отмечающийся сегодня во многих странах, связан с высоким накоплением брома в окружающей среде. Вг является одним из наиболее сильных конкурентов йода за активные центры ферментов (*Верховская, 1962; Кривобок, 1972; Авцын, 1991*), способен препятствовать его поглощению (*Pavelka, 2001*), а также снижать его количество в щитовидной железе, коже и грудном молоке (*Pavelka, 2002*). Отмечается, что при тиреотоксикозе в организме человека наблюдаются высокие уровни брома (*Верховская, 1962*). Кроме того, сведения *Денисовой и др. (2011)* указывают на связь брома с заболеваемостью диффузным нетоксическим зобом. Согласно *Турецкой Э.С. (1963)*, содержания брома в патологически измененной щитовидной железе более чем в 10 раз превышает его содержание в нормальное железе.



Ввиду вышеизложенного, особенный интерес представляет рассмотрение количественного содержания брома в организме человека при различных патологических состояниях (таблица 1.1).

**Таблица 1.1** – Содержания брома в организме людей, страдающих различными заболеваниями

Заболевание		Объект исследования		Содержание, мг/кг <sup>1</sup>	Детали исследования	Источник
Ожирение		Волосы		17,0 ± 5,0	–	Zhuk et al., 1995
Сахарный диабет				17,0 ± 3,2	–	
Сахарный диабет		Кровь		3,6 ± 0,02 мг/мл	–	Ward et al., 1984
Катаракта		Хрусталик глаза		1,0 ± 0,5µс/с	Жители Чехии (50-80 лет)	Stverak et al., 1988
Злокачественные образования	Молочная железа	Кровь		23,2 ± 3,6	Жители Индии	Sarita et al., 2011
		Волосы		6,1 ± 0,7	Жители Узбекистана	Zhuk et al., 1995
	23,0 ± 3,8			–		
	24,0 ± 4,6			–		
	Головной мозг	Головной мозг	Ядро	0,219 ± 0,147 мг/г	–	Zheng et al., 1992
			Митохондрия	< 0,094 мг/г	–	
			Миелин	0,044 мг/г	–	
			Синаптосома	< 0,030 мг/г	–	
Легкие	Костная ткань		15,8	–		
			10,0	–		
Мочекаменная болезнь	Камни в почках	Мочекислые	34,4 ± 5,8	Жители г.Куала-Лумпур (Малайзия)	Sarmani et al., 1989	
		Кальциево-оксалатные	11,4 ± 8,4			
		Ксантиновые	6,4 ± 0,7			
Врожденный миокардоз	Волосы		4,3 ± 0,9	Дети (Узбекистан)	Zhuk et al., 1995	
Церебральный лептоменингит			28,0 ± 6,0	Жители Узбекистана		
Тромбоз сосудов головного мозга	Костная ткань		19,3	–	Hyvonen-Dabek et al., 1981	
Фиброзирующий альвеолит			5,5	–		
Повышенное кровяное давление			20,3	–		
Аортальная и митральная недостаточность			8,2	–		
Субарахноидальное кровоизлияние			11,2	–		

<sup>1</sup> Если не указано иное

Как видно из представленной таблицы, при различных патологиях возможны изменения содержания брома в организме человека. Важную роль в колебаниях элемента в организме также играют тип лечения и принимаемые медикаменты. Так, содержание брома значительно увеличилось в крови (от 2,31 мг/л в начале лечения до 9,53 мг/л в конце) и моче (от 1,40 до 3,88 мг/г) пациентов, проходивших трехнедельное лечение в бальнеологическом центре в Австралии (*Buchberger et al., 1989*). В сыворотке крови больных сахарным диабетом и получивших лечение инсулином было обнаружено  $3,57 \pm 0,024$  мг/мл брома, не прошедших лечение –  $3,26 \pm 0,47$  мг/мл и людей, не страдающих диабетом –  $3,66 \pm 0,20$  мг/мл (*Ward et al., 1984*).

Исследования *Metairon S. et al. (2009)* показывают, что в крови пациентов с хроническим заболеванием почек, содержания брома варьируют в зависимости от типа и срока лечения. Авторами было изучено распределение брома в крови больных мужчин и женщин от 25 до 66 лет, проживающих на территории Бразилии. Больные пациенты были объединены в 4 группы, по 6 человек в каждой, в зависимости от типа и срока лечения. Содержание  $^{80}\text{Br}$  в первой группе пациентов, для которой применялось консервативное лечение (только медицинский и пищевой контроль в течении 17 месяцев) было  $31 \pm 4$  мг/л; во второй (подвергались перитонеальному диализу в течении двух лет) –  $25 \pm 10$  мг/л; в третьей (гемодиализ в течении 2 лет) –  $20 \pm 9$  мг/л; в четвертой же группе (гемодиализ в течении 5–11 лет) содержание элемента было значительно ниже –  $6 \pm 7$  мг/л. Таким образом, было установлено, что бром в крови удаляется гемодиализом или перитонеальным диализом, и что уровень брома в крови у пациентов на хроническом гемодиализе ниже нормы (*Tomza et al., 1984*).

В лекарственных препаратах было обнаружено следующее содержание брома (мг/г): амоксициллин –  $0,56 \pm 0,04$ , атенол –  $1,98 \pm 0,12$ , клавулановая кислота –  $3,41 \pm 0,16$ , клоназепам –  $1,99 \pm 0,16$ , галоперидол –  $7,75 \pm 0,62$ , имипрамин –  $4,37 \pm 0,26$ , нимесулид  $<0,02$ , дилтиазем –  $6,18 \pm 0,28$ , пропранолол –  $4,51 \pm 0,37$ , диклофенак –  $13,4 \pm 1,0$  (*Muller et al., 2012*). В 5 марках аспирина в Египте было найдено  $0,08 - 0,4$  мг/кг брома (*Iskander et al., 1986*), а в американских брендах  $0-9$  мг/кг (*Hichwa et al., 1981*).

Ввиду широкого применения брома в медицинских целях, серьезной проблемой являются связанные с ним ятрогенные патологии (*Авицын, 1991*). Повышенное потребление брома и передозировка во время лечения могут вызывать угнетение нервной системы, сонливость, атаксию, снижение болевой чувствительности, слуха, зрения, ослабление памяти, психотические нарушения, сопровождающиеся зрительными, слуховыми и др. галлюцинациями. Хроническое отравление бромом и его соединениями (бромизм) проявляется катаральным ринитом, бронхитом, а также кожными поражениями (бромодерма).

### ***1.3 Гигиенические нормативы***

Несмотря на широкое использование брома, потенциальную опасность, обусловленную антропогенным поступлением элемента в окружающую среду, а также его негативным влиянием на живые организмы, на сегодняшний день наблюдаются не только значительные пробелы в установлении гигиенических нормативов для элемента, но и полное их отсутствие для некоторых объектов природной среды.

В наиболее полном объеме бром нормируется в атмосферном воздухе и водной среде. В атмосферном воздухе для элемента установлены: предельно—допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны, которая составляет  $0,5 \text{ мг/м}^3$  (ГН 2.2.5.1313-03), ПДК в атмосферном воздухе населенных мест –  $0,04 \text{ мг/м}^3$  (ГН 2.1.6.1338-03). Согласно данным нормативам бром относится ко II классу опасности, т.е. является высоко опасным.

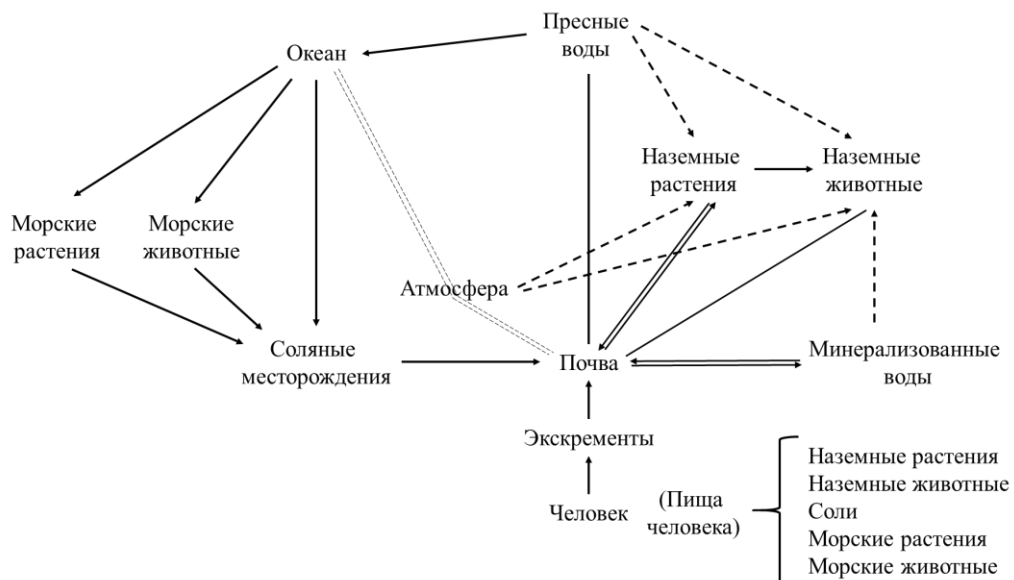
Установленные гигиенические нормативы для брома в воде включают: ПДК в воде водных объектов хозяйственного-питьевого и культурно-бытового водопользования –  $0,2 \text{ мг/л}$  по санитарно-токсикологическому показателю (ГН 2.1.5.1315-03), ПДК для питьевых вод (СанПиН 2.1.4.1116-02), а также ПДК для вод рыбохозяйственных водоемов –  $1,35 \text{ мг/л}$  (Перечень..., 1995).

Однако, полное отсутствие каких-либо нормативов наблюдается для брома в почвах. Не установлены они для галогена и в продуктах питания. В санитарно-эпидемиологических правилах и нормативах отмечаются несколько пищевых добавок (в составе которые присутствует бром), запрещенных к применению при производстве пищевых продуктов, такие как броматы калия и кальция, использующиеся как улучшители муки и хлеба, а также бромелайн, использующийся в качестве стабилизатора, ускорителя созревания мяса и рыбы, а также усилителя вкуса и аромата (СанПиН 2.3.2.1078-01).

## ГЛАВА 2. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БРОМА В ПРИРОДНО – ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

Для полноценного комплексного анализа закономерностей накопления и распределения брома в окружающей среде чрезвычайно важным, на наш взгляд, является изучение элемента в пределах функционирования биосферы, в единстве ее биотических и абиотических, неразрывно связанных между собой, составляющих. Еще В.И. Вернадский (1922, 1994) отмечал, что невозможно рассматривать компоненты биосферы изолированно друг от друга. В состав биосферы входят атмосфера, гидросфера, живое вещество и верхняя часть земной коры с весьма неопределенным положением границы (Ярошевский, 2004). Все составляющие связаны между собой потоками вещества и энергии и должны рассматриваться не как обособленные звенья, а взаимосвязанное целое. Такой подход позволяет не только изучить содержания элемента в отдельных компонентах окружающей среды в количественном отношении, но и рассмотреть последовательные звенья биогеохимической пищевой цепи во всей их совокупности, а также проследить связь между геохимическими факторами среды и живыми организмами.

На основе литературных данных, нами были рассмотрены балансы распределения брома в резервуарах биосфер в рамках круговорота элемента в природе (рисунок 2.1).



**Рисунок 2.1** - Круговорот брома в природе (Розен, 1970)

Суммарное относительное содержание брома в земной коре невелико. Главным источником галогена в природных системах служит Мировой океан, в водах которого его содержится в 30 раз больше, чем в наиболее распространенных горных породах литосферы (Перельман, 1979). В больших количествах бром содержится в соляных маточниках – конечных продуктах испарения морской воды, соляных озерах и озерной рапе, сильноминерализованных

пластовых водах, а также водах нефтяных месторождений (*Виноградов, 1939; Полянский, 1980; Химическая энциклопедия, 1988; Эмсли, 1991; Иванов, 1996*). Живые организмы и наземное испарение в гидросфере играют очень важную роль в круговороте брома в природе, так как первые являются концентраторами брома, а гидросфера, в свою очередь, является сосредоточением промышленных скоплений данного элемента. Кроме того, все возрастающая активная антропогенная деятельность также приводит к значительному увеличению содержания элемента в окружающей среде, что, несомненно, влияет на его круговорот в природе.

В настоящее время области использования брома и его соединений весьма многочисленны – химическая промышленность, медицина и фармацевтика, сельское хозяйство и многие другие (таблица 2.1). Около 80% промышленного производства брома приходится на его органические соединения (*Yoffe et al., 2013*).

Значительная часть мирового производства элемента применялась для синтеза дибромэтана, который вместе с дихлорэтаном использовался в качестве компонента этиловой жидкости – антидетонационной добавки к авто- и авиатопливу (*Полянский, 1980; Ксензенко, 1995; Гринвуд, 2008*). Резкое сокращение использования этилированного бензина, обусловленное экологическим законодательством, привело к сокращению производства дибромэтана, которое, однако, было компенсировано значительным расширением других областей применения элемента.

Существенная часть брома используется для получения метил бромид ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ) – одного из самых известных пестицидов общего назначения, применяющегося также и в других отраслях, в том числе как промежуточный продукт в фармацевтике. Мировое производство бромистого метила составило 48273 тонн в 1985 году, 24 258 тонн в 2009 году, при этом максимум производства был зафиксирован в 1995 году – 70 038 тонн (*Yoffe et al., 2013*). Отмечается, что в 1960 – х гг. в Калифорнии около 100% выращиваемой клубники было обработано бромметаном (*Duafala, Gillis, 1999*). Довольно сложной является оценка выбросов метил бромид в окружающую среду ввиду комплексности его использования. По оценкам исследователей, в 1995 году около 24 000 тонн бромметана поступило в окружающую среду от его использования в качестве почвенного фумиганта, примерно 13 000 тонн – от использования в виде товарного фумиганта (обработка зерен и плодов для транспортировки), 5000 тонн – от использования этилированного бензина, а также 20 000 – от антропогенного сжигания биомассы (*Duafala, Gillis, 1999*). В связи с тем, что метилбромид относится к веществам, разрушающим озоновый слой, в настоящее время его использование регулируется Монреальским Протоколом (*UNEP, 1996*). В 2005 году он был запрещен к использованию на территории Российской Федерации, однако в 2011 году под названием «Метабром – РФО» был вновь включен в список и разрешен к

применению для обеззараживания различных типов зерновой продукции, семян и др. (Мордкович, 2011).

**Таблица 2.1** – Основные области применения брома и его соединений

Вид деятельности	Применение (пример)	Источник
Химическая промышленность	<ul style="list-style-type: none"> <li>– антидетонационная добавка к топливу (этилдибромид – <math>C_2H_4Br_2</math>);</li> <li>– антипирены – специальные добавки, снижающие воспламеняемость различных материалов: пластмасса, волокна и др. (<math>C_{24}H_{34}Br_4O_4</math>; <math>C_{12}Br_{10}O</math>; <math>NH_4Br</math>; <math>CaBr_2</math>; <math>BrCl</math>);</li> <li>– растворитель красок (этилдибромид);</li> <li>– производство синтетического каучука;</li> <li>– производство средств для обеззараживания воды (бензилбромацетат; <math>NaBr</math>; <math>BrCl</math>);</li> <li>– в химических анализах (бромформ);</li> <li>– окислитель ракетного топлива (<math>BrF_5</math>);</li> <li>– добавка к фторсодержащим окислителям и др.</li> </ul>	Полянский, 1980 Ксензенко, 1995 Гринвуд, 2008 Yoffe et al., 2013
Сельское хозяйство	<ul style="list-style-type: none"> <li>– пестицид общего действия (метилбромид; 3-бром-1-пропен; бромхлорметан; <math>CF_3Br</math>);</li> <li>– нематоцид (этилдибромид; метилбромид)</li> </ul>	Ксензенко, 1995 Гринвуд, 2008 Yoffe et al., 2013
Медицинская/фармацевтическая промышленность	<ul style="list-style-type: none"> <li>– синтез фармацевтических препаратов и витаминов (1-бром-2-фенилэтан; бромхлорметан; <math>CF_3Br</math>; <math>BrCl</math>; <math>Br(CH_2)_3Cl</math> в производстве флуфеназина, гемфиброзила, тразодона, опипрамола; метилбромид в производстве клобазама, гликопирролата и мн.др.);</li> <li>– исследование механизма действия бромсодержащих лечебных препаратов (<math>^{82}Br</math>);</li> <li>– при неврозах, истерии, повышенной раздражительности, бессоннице, гипертонических болезнях, эпилепсии и хорее (<math>NaBr</math>; <math>KBr</math>; <math>LiBr</math>; <math>NH_4Br</math>; <math>CaBr_2</math>);</li> <li>– лечение ожирения;</li> <li>– в ультрамалых дозах лечит эндокринные заболевания без гормональных препаратов;</li> <li>– лечение злокачественных опухолей (<math>^{82}Br</math>)</li> </ul>	Филов, 1988 Yoffe et al., 2013
Пищевая промышленность	<ul style="list-style-type: none"> <li>– отбеливатель муки (<math>KBrO_3</math>; <math>Ca(BrO_3)_2</math>);</li> <li>– добавка для сохранения консистенции пищевых продуктов (бромированное масло – E443);</li> <li>– пищевая добавка – биотин (<math>Br(CH_2)_3Cl</math>)</li> </ul>	Yoffe et al., 2013
Ядерная промышленность	<ul style="list-style-type: none"> <li>– фторирование урана до <math>UF_6</math> в процессах получения и регенерации ядерного топлива (<math>BrF_3</math>)</li> </ul>	Гринвуд, 2008
Другие	<ul style="list-style-type: none"> <li>– тушение пожаров в радио- и электроаппаратуре (<math>CH_2BrCl</math>; <math>CF_3Br</math>; <math>CF_2BrCl</math>);</li> <li>– высокоплотные жидкости для буровых растворов (<math>NaBr</math>; <math>KBr</math>; <math>CaBr_2</math>; <math>ZnBr_2</math>);</li> </ul>	Ксензенко, 1995 Филов, 1988

Продолжение таблицы 2.1

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– в абсорбционных холодильных машинах и установках для кондиционирования воздуха (<i>LiBr</i>);</li> <li>– для изготовления светочувствительных материалов кино- и фото промышленности (<i>AgBr</i>; <i>NaBr</i>; <i>KBr</i>; <i>NH<sub>4</sub>Br</i>; <i>CaBr<sub>2</sub></i>; <i>CuBr<sub>2</sub></i>);</li> <li>– ограничение выбросов ртути в окружающую среду (<i>CaBr<sub>2</sub></i>);</li> <li>– производство оружия (боевые отравляющие вещества);</li> <li>– металлургия золота и платины</li> </ul>	<p>Гринвуд, 2008 Yoffe et al., 2013</p>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------

Вследствие столь широкого антропогенного использования брома и его соединений происходит перераспределение элемента в природных системах, что приводит к загрязнению окружающей среды. Отмечается, что в высоких содержаниях бром обнаруживается в сточных водах химико-фармацевтических, нефтехимических, горнорудных предприятий (Грушко, 1982), а также в стоках предприятий теплоэнергетической отрасли (Иванов, 1996). Атмосферная эмиссия брома фиксируется при различных технологиях сжигания углей. Исследования показывают, что бром практически не осаждается в уносах и не остаётся в золе, а поступает в атмосферный воздух вместе с парами воды и газами (Кизильштейн, 2002; Юдович, Кетрис, 2006). Кроме того, многочисленными работами были неоднократно показаны повышенные содержание элемента в компонентах природной среды, расположенных вблизи предприятий теплоэнергетической отрасли, нефтехимического производства, а также ядерно – топливного цикла (Экология ..., 1994; Шатилов, 2001; Барановская, 2003; Язиков, 2006; Эколого-геохимические ..., 2006; Таловская, 2008; Жорняк, 2009; Межибор, 2009; Барановская, 2011; Наркович, 2012; Филимоненко, 2015 и мн.др.). Высокие уровни накопления галогена отмечаются в атмосферном воздухе вблизи автодорог (Yatin et al., 2004), а также в снеговом покрове вблизи аэропортов (Zikovsky, 1986).

В целом же стоит отметить, что бром имеет высокие показатели техногенности и техногенного давления – 0,1–1 мг/км<sup>2</sup>, а также один из самых высоких показателей техногенного использования (Иванов, 1996). Однако, техногеохимия элемента изучена крайне слабо, а особенности его техногенного концентрирования в компонентах окружающей среды требуют пристального внимания.

### **2.1 Содержание брома в гидросфере и атмосфере**

В гидросфере сосредоточено около 75% всего имеющегося брома, при этом основная его масса сконцентрирована в Мировом океане. Среди всего количества элементов, обнаруженных в морской воде, бром занимает девятое место по количественному соотношению в общей солевой

массе (Розен, 1970). Начиная с М. Балара, открывшего бром в 1826 году в воде средиземноморских соляных рассолов, появляются многочисленные указания на его присутствие в водах морей. Неудивительно, что содержание элемента в морской воде является одной из наиболее точно установленных постоянных и составляет 65–67 мг/кг (Красинцева, 1968; Розен, 1970; Полянский, 1980; Иванов, 1996), однако его концентрация может изменяться в зависимости от солености источника. Так как соленость вод колеблется в связи с климатическими зональностями, то в одном и том же объекте содержание брома может значительно варьироваться. Основная форма нахождения в воде – анионная ( $\text{Br}^-$ ). Отношение  $\text{Cl}/\text{Br}$  является важным генетическим показателем для характеристики природных вод (Виноградов, 1939).

Важной особенностью элемента является его высокий коэффициент водной миграции, а также высокая талассофильность, т.е. содержание в морской воде значительно выше, чем концентрация в пресных водоемах (Иванов, 1996). В последних среднее содержание составляет около 0,2 мг/л (Филов, 1988), при этом в пресных озерах и грунтовых водах – не более 0,01 мг/л, а в речных водах – 0,03 мг/л (Перельман, 1979). Глобальный годовой вынос брома с речным стоком находится на уровне 740 тыс. т (Филов, 1988). В реках и подземных водах гумидных районов чаще всего отмечаются более низкие концентрации галогена по сравнению с аридными районами, в которых наибольшее количество элемента фиксируются в соляных озерах и солончаках.

В подземных и сильноминерализованных водах отмечаются повышенные содержания элемента. При этом, как правило, наблюдается прямая зависимость между концентрацией брома, кальция и степенью метаморфизации подземных вод. Количество брома может увеличиваться параллельно увеличению общего количества хлора, а также с повышением общей минерализации и глубины залегания водоносных отложений (Розен, 1970).

Многие исследователи (Виноградов, 1939; Сулин, 1946; Кротова, 1956) полагают, что подземные высокоминерализованные йодо-бромные воды представляют собой сильно изменившиеся рассолы древних мелководных морей. Илистый материал этих морей очень богат остатками организмов, из которых, по современным представлениям, образовалась нефть. Считается также, что рассолы артезианских бассейнов, в которых наблюдаются мощные накопления брома, генетически связаны с эвапоритовыми толщами (Юдович, Кетрис, 2006).

Достаточно ясное представление о распространённости брома в объектах водной среды дает таблица 2.2.



Таблица 2.2 – Содержания брома в гидросфере по данным различных исследователей (мг/л)<sup>2</sup>

Объект	Пункт наблюдения	Содержание	Источник	Объект	Пункт наблюдения	Содержание	Источник
Океан	–	65–67	Виноградов, 1939	Пресные озера и грунтовые воды	–	не более 0,01	Перельман, 1979
			Красинцева, 1968				
			Розен, 1970				
			Полянский, 1980				
			Иванов, 1996		Байкал	0,2	Shouakar–Stash et al., 2007
Воды морей	–	4,6–70	Полянский, 1980	Речные воды	–	0,001–0,1	Полянский, 1980
	Азовское море (глуб. 0–9 м)	29,9	Красинцева, 1968		–	0,03	Перельман, 1979
	Черное море (глуб. 0–1000 м)	35,4			–	0,02	Виноградов, 1939
	Черное море (глуб. 0–2000 м)	32,0			Днепр	37,5 γ/л	Красинцева, 1968
Воды соляных озер	–	50–800	Полянский, 1980	Енисей	45,8 γ/л		
–	–	до 1300	Перельман, 1979	Лена	11,2 γ/л		
–	–	–	–	Обь	18,9 γ/л		
Озерная рапа	–	n* 100 – n*1000	Полянский, 1980	Воды нефтяных месторождений	–	n*100	Полянский, 1980 Розен, 1970
Йод–бромные воды	–	до 1900	Перельман, 1979	Воды нефтяных месторождений и другие рассолы	США (Брэдфорд)	300	Виноградов, 1939
Сильноминерал. пластовые воды	–	1200	Полянский, 1980		Румыния	2–1000	
Слабоминерал. воды артезианских бассейнов	–	5–20	Полянский, 1980		СССР	5–2000	
Глубинные воды	–	20–4000	Перельман, 1979		Югославия	0,8–6	
	Сибирская платформа	2000–8500	Shouakar–Stash et al., 2007		Италия	180	
		6500–12600	Шварцев и др., 2012		Ява	20–80	

<sup>2</sup> Если не указано иное

Относительно аэрохимии брома, первые упоминания о ней мы находим в работе М.Маршана (*Marchand, 1852*), впервые обнаружившего галоген в атмосферных осадках (дождь). Позднее были также получены данные об элементе в воздухе Одессы (*Бурксер, 1937*) и в аэрозолях на Гавайях (*Duce et al., 1963*). Установлено, что содержания брома в воздухе приморских территорий значительно выше, чем в воздухе континентальных районов, что происходит за счет перехода элемента в атмосферу вместе с морской водой – около 4 млн. тонн (*Полянский, 1980*). Отмечается, что 2500 т брома в год поступает в атмосферный воздух в результате ветровой эрозии почв, 670 т в год – в результате извержения вулканов, 0,5 т в год – с космической пылью, 20000 т в год – от лесных пожаров, а 60000 т в год – от промышленности и транспорта (*Остромогильский, 1984*).

Процессы выноса галоида из моря в атмосферу и дальнейшая его метаморфизация над континентом имеют важное значение в аэрохимии элемента (*Памяти первых..., 1994*). В атмосфере бром может находиться в виде  $\text{Br}^{\cdot}$ ,  $\text{Br}_2\text{O}$ ,  $\text{BrCl}$ ,  $\text{BrONO}_2$ , а также органических соединений (например,  $\text{CH}_3\text{Br}$ ). Содержания брома в атмосфере представлены в таблице 2.3.

На высоте 300-1500 м аэрозоли чрезвычайно обеднены бромом, что происходит за счет фотохимических реакций окисления бромида до свободного брома в присутствии  $\text{O}_2$  под влиянием солнечного света (*Красинцева, 1968*).

**Таблица 2.3** – Содержания брома в атмосфере по данным различных исследователей ( $\text{нг/м}^3$ )<sup>3</sup>

Объект	Пункт наблюдения	Содержание	Источник
Атмосфера	–	0–1,5 $\gamma/\text{л}$	Красинцева, 1968
Атмосферный воздух	Южный полюс	0,33–1,41	Иванов, 1996
	Гренландия	14–20	
	США	6–1200	
	Центральная Америка	65–460	
	Южная Америка	2–200	
	Япония	1,6–150	
	Токио	17	Miura, 1990
	Норвегия	4,4	Иванов, 1996
	Германия	30–2500	
	Анкара	680	Yatin, 1994
	Афины	130	Scheff, 1990
	Бангкок	41	Chueinta, 2000
	Барселона	420	Ferrer, 1990
	Будапешт	29	Salma, 2001
	Сантьяго	71	Rojas, 1990
	Черновцы	105	Scheff, 1997
	Одесса	23,4 $\gamma/\text{м}^3$	Бурксер, 1937
	Москва	2,3 $\gamma/\text{м}^3$	Памяти первых..., 1994
Максимум в городах	1500	Иванов, 1996	
Промышленные города	1300	Сагт, 1990	

<sup>3</sup> Если не указано иное

Продолжение таблицы 2.3

Объект	Пункт наблюдения	Содержание	Источник
Атмосферный воздух	Фоновый район города	17	Иванов, 1996
	Пригородный фон	50	
	Региональный фон	7	
	Природный фон в Западной Европе	30	
	Природный фон в Западной Сибири	4	
	Приморские области	0,03	Розен, 1970
	Континентальные области	0,002	
Атмосферные осадки, мг/кг	–	0,005	Красинцева, 1968
	–	0,004-0,03	
Вулканические эксгаляции	Ключевской вулкан	0–30 мг/кг	Красинцева, 1968
	Италия (вулкан Стромболи)	4719 мг/м <sup>3</sup>	Bichler et al., 1995

В последнее время все более пристальное внимание обращается на бром и его органические соединения (фторбромфреоны) ввиду их озон разрушающей способности. Бром действует как катализатор рекомбинации озона, и по разным оценкам на его долю приходится около 15-35 % от разрушения озонового слоя галогенами (*Smoydzin et al., 2009*).

### 2.2 О вариативности содержаний брома в литосфере

По оценкам разных авторов содержание брома в земной коре составляет 1,6 мг/кг (*Виноградов, 1949*); 2,1 мг/кг (*Виноградов, 1962*); 2,5 мг/кг (*Гольдшмидт, 1937*), что определяет примерно 46–50 место его распространённости. Кларк Вг в земной коре практически совпадает с кларком гафния (2,8 мг/кг), цезия (2,6 мг/кг), урана (2,3 мг/кг), европия (2,1 мг/кг), а также олова (2,1 мг/кг). Собственные минералы брома очень редки и представлены бромаргиритом (AgBr), иодобромитом (2AgCl\*2AgBr\*AgI) и эмболитом (Ag(Cl, Br)). Однако, в виде изоморфной примеси элемент содержится во многих минералах и породах: поваренной соли, сильвините, карналлите, бишофите, биотите, апатите, кварце и др. (*Иванов, 1996*). Обобщение многочисленных данных, представленных в таблице 2.4, дает общее представление о содержаниях брома в горных породах, почвах и других объектах.

#### Почва

Впервые распределение брома в почвах было исследовано Л.С. Селивановым, благодаря чему были изучены закономерности его накопления (*Селиванов, 1939*). Данные об элементе в почвенных покровах мы находим также в работах А.П. Виноградова, А. Кабата-Пендиас, Б.Я. Розена и многих других. Серьезный вклад в изучение брома (наряду с другими галогенами) в почвах юга Западной Сибири внесла и по сей день продолжает вносить старший научный сотрудник, д.б.н. Конарбаева Г.А. Данные исследований показывают, что содержание брома в почвах обычно колеблется в пределах 5–40 мг/кг (*Кабата-Пендиас, 1989*), по Виноградову (*1957*) в среднем оно составляет 5 мг/кг. В почвах элемент может находиться в виде различных ионов: Br<sup>-</sup>, BrO<sup>-</sup>, BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>, BrO<sub>4</sub><sup>-</sup>, элементарный бром в почвах, как правило, не встречается.

На сегодняшний день нет единого мнения об источнике обогащения почв бромом. Считается, что основными источниками элемента в почвах являются вулканические эксгаляции и морская вода. Некоторые авторы предполагают, что обогащение верхних горизонтов почв галогеном в значительной степени обусловлено его выпадением в составе атмосферных осадков (*Кабата-Пендиас, 1989*). Так, например, согласно оценкам (*Памяти первых..., 1994*) ежегодное количество брома, вносимого в почву с осадками, составляет 24 г/га. Другие исследователи указывают на существенный вклад растительного опада, который, образуя подстилку, способен аккумулировать различные элементы, необходимые почвенным микроорганизмам для сложных биогеохимических процессов трансформации органического вещества (*Виноградов, 1957; Филов, 1989*). Не исключено, что для разных типов почв возможны различные пути поступления и выноса брома. Например, в черноземах доминирующим поступлением элемента являются атмосферные осадки и его вынос с поверхностными водами, тогда как для солончаков поступление галогена осуществляется как с атмосферными осадками и поверхностным стоком, так и грунтовыми водами, а вынос – с нисходящими гравитационными растворами (*Конарбаева, 2008*).

Среди множества разнообразных компонентов, приоритетная роль в аккумуляции брома остается за гумусом (*Селиванов, 1946; Виноградов, 1957; Розен, 1970*). Условия увлажнения почв также играют значительную роль в накоплении элемента, так как они в большой степени влияют на скорость миграции галогена. Работами Г.А. Конарбаевой (*2004, 2008*) было показано, что почвообразующие породы на современном этапе не играют серьезной роли в накоплении брома, особенно для верхних горизонтов. Однако, они могли служить источниками элемента в процессе их формирования. Несмотря на сорбцию брома органическим веществом и глинами, он является элементом, легко выщелачиваемым из почвенного профиля и в больших количествах выносящимся в океанические бассейны (*Кабата-Пендиас, 1989*). Бром концентрируется, преимущественно, в зональных типах почв, богатых гумусом и в интразональных, обогащенных тонкодисперсными минеральными частицами и обладающих щелочной реакцией. Максимальные его концентрации обнаруживаются в солонцах, а минимальные – в дерново-подзолистых почвах (*Конарбаева, 2001*), а также в лесных и сероземах, которые, как правило, бедны бромом из-за низкого содержания в них органического вещества (*Кабата-Пендиас, 1989*).

### Торф

Еще в довоенные годы Л.С. Селиванов показал, что болота являются своеобразными бромными биогеохимическими провинциями (*Селиванов, 1939*). Содержания брома в торфах обычно выше, чем в почвах и могут достигать 100 мг/кг (*Бернатонис и др., 1989*), однако данные

о форме нахождения элемента до сих пор мало изучены. Имеется информация о том, что бром в торфах может быть первично-растительным  $Vr_{\text{био}}$ , находящимся в растениях в виде прочного, мало растворимого в воде соединения. Однако, не исключается также и присутствие сорбционного брома  $Vr_{\text{сорб}}$  (Юдович, Кетрис, 2006). Элемент может поступать в торфяники в составе атмосферных осадков. Вг в торфах распределен неравномерно, при этом его концентрации варьируются в зависимости от типа торфяных месторождений: наименьшие содержания элемента отмечаются в верховых торфах – 10,5 мг/кг, а наибольшие – в низинных – 33,8 мг/кг (Бернатонис и др., 1989). Следует отметить, что увеличение концентраций брома может наблюдаться как с глубиной, так и в верхних слоях.

#### Уголь

Первые изучения элемента в углях были сделаны в Германии в 30-х гг. XX века, последующие данные появились только 30 лет спустя (Юдович, Кетрис, 2006). Существующие геохимические данные позволяют предполагать о том, что элемент является типоморфным для углей (Юдович и др., 1985). Обогащение углей галогеном связано с формирующей их растительностью, воздействием моря и вулканической деятельностью. Выделяют несколько форм нахождения Вг: минеральную ( $Vr_{\text{мин}}$ ), сорбированную ( $Vr_{\text{сорб}}$ ) и органическую ( $Vr_{\text{орг}}$ ). Многочисленные данные свидетельствуют о том, что последняя является доминирующей (Юдович и др., 1985; Клер и др., 1987). Отмечается, что присутствие  $Vr_{\text{орг}}$  может быть связано не с самим органическим веществом, а с компонентами сорбционной золы. Средние содержания брома в углях составляют 5,2 мг/кг (Юдович, Кетрис, 2006). Однако, концентрация и форма нахождения элемента могут изменяться как в термальном эпигенезе, так и при гипергенном окислении углей. Данные исследований демонстрируют также связь между уровнями накопления брома и метаморфизмом углей: содержание в лигнитах – 14 мг/кг, в суббитумозных углях – 16 мг/кг, а в битуминозных – 67 мг/кг (Юдович, Кетрис, 2006).

#### Нефть

В настоящее время имеется недостаточно информации о распространенности и формах нахождения брома в сырой нефти, и еще меньше в коммерческих нефтепродуктах. Так, например, в примесях сырой нефти Западной Сибири бром был обнаружен только в 8 пробах из 24, при этом его содержание варьировалось от 1,6 до 14 мг/кг (Begak et al., 2001), тогда как в сырой нефти Ливии – 0,65 мг/кг (Shah et al., 1970). В дизельном топливе и в бензине Бельгии – 32 мг/г и 250 мг/г брома соответственно (Block et al., 1978).

Таблица 2.4 – Содержания брома в объектах литосферы (мг/кг)

Объект		Пункт набл.	Содержание	Автор	Объект	Пункт набл.	Содержание	Автор	
<i>Горные породы</i>					<i>Почвы</i>				
Магматические	Ультраосн.	–	0,2–1,0	Кабата-Пендиас, 1989; Pendias, 2011	В целом	–	5–40	Кабата-Пендиас, 1989	
	Основные	–	0,5–3,0			–	5	Виноградов, 1957	
	Средние	–	1–4			Зап.Сибирь	0,03–59,7	Конарбаева, 2004	
						Великобрит.	10–515	Кабата-Пендиас, 1989	
	Кислые	–	0,3–4,5			Япония	3–495	Yuita, 1983	
						США	5,6	Shacklette, 1984	
Кислые вулкан.	–	0,2–1,0	Подзолы	–	1,9	Розен, 1970			
Осадочные	Глинистые осадки	–	5–10	Собственные исследования	Лесные серые	–	5,7	Розен, 1970	
	Сланцы	–	6–10		Чернозем	–	8,0	Розен, 1970	
	Песчаники	Верхнекамск. местор-ние	–		1–5	Каштановые	–	1,5	Розен, 1970
			15–20		11–17	Серозем	–	9,8	Розен, 1970
	Известняки, доломиты	–	6		Кабата-Пендиас, 1989	Краснозем	–	7,0	Розен, 1970
						Глины и сланцы	–	4–8	Красинцева, 1968
–	–	6	Перельман, 1989	–	2,5	Виноградов, 1950			
В целом	–	7	Красинцева, 1968	Торф	–	11,5–56,5	Селиванов, 1946		
Кристаллические породы	–	2,1	Красинцева, 1968		–	30	Перельман, 1979		
	–	1,7–5	Полянский, 1980		Томская область	1,4–104,9	Бернатонис, 1989		
Вулканические породы	–	5,5	Красинцева, 1968		Италия	16,3	Ntahokaja, Zikovsky, 1995		
	–	0,6–56			Полянский, 1980			Финляндия	
Каменные метеориты	–	2200–3400	Розен, 1970		Ирландия				
	–	34–775	Собственные исследования		Кузбасс (зола)	42,5	Арбузов, 2000		
Карналлит	Верхнекамск. местор-ние	58–551			Сильвинит	255–541	Уголь	Бельгия	23
Каменная соль		–	–			Болгария		1330	
Травертины	Памукалле	Турция	1		Монголина, 2011	Украина	1620	Vassilev et al., 2000	
	Таловские чаши	Томская область	21,2						
	Виши	Франция	6–36						

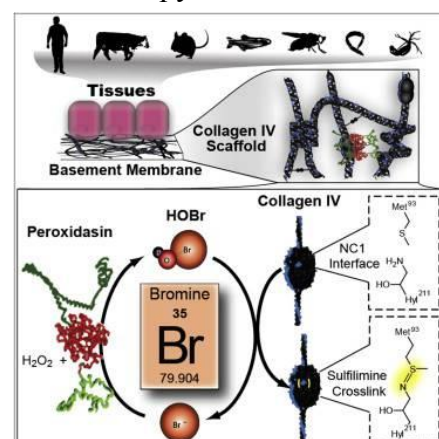
### 2.3 Бром в живых организмах

Несмотря на постоянное нахождение брома во всех живых организмах, вопрос об его эссенциальности долгое время не был четко установлен, прежде всего, по причине недостаточной изученности биологической роли. В существующих классификациях химических элементов нет единой точки зрения о физиологической роли этого галогена. Согласно классификациям *А. Ленинджера (1985)*, *П. Аггетта (1985)* и *В. Мерца (1982)* очевидно, что бром не является элементом, играющим жизненно важную роль в организмах. *В.В. Ковальский (1974)* относит элемент к условно необходимым, отмечая при этом, что его биологическая роль может быть открыта. Из биогенной классификации *А.В. Бгатова (1999)* также следует, что бром относится к условно эссенциальным элементам. По мнению *Авцына и др. (1991)* Br является элементом, постоянно определяемым в животных организмах, значение которого изучено недостаточно. Об эссенциальности элемента свидетельствуют данные *М. Анке (2001)*.

Кроме того, в свое время еще *А.И. Перельман* обратил внимание на расположение брома в Периодической системе *Д.И. Менделеева*, согласно которой он «окружен» элементами, играющими важную роль в физиологии живых организмов и крайне неравномерно распределенных в ландшафтах (рисунок 1.1), чем обусловлено наличие различного рода биогеохимических аномалий. Помимо того, что автор указывает на высокий показатель биофильности брома, сопоставимый с хлором и фосфором (0,75), им также была высказана гипотеза о важной биогеохимической роли брома в эволюции нервной системы (*Перельман, 1979*).

Недавнее открытие американских ученых (*McCall et al., 2014*) поставило окончательную точку в вопросе эссенциальности элемента. Результаты исследований

Вандербильского университета (США) показали, что без брома молекулы коллагена IV типа, которые играют важную роль в сохранении целостности эпителиальных и эндотелиальных клеточных оболочек, не смогут связываться друг с другом должным образом для образования структурного белка соединительной ткани, что может привести к нарушению ее развития (рисунок 2.2). В ходе проведения эксперимента было показано, что бром является эссенциальным для всех без исключения живых организмов. «Без брома нет жизни. Это открытие» – заключил ведущий автор исследования профессор *Billy Hudson*.



**Рисунок 2.2** – Роль брома как кофактора в формировании коллагена IV типа (*McCall et al., 2014*)

### *Содержание брома в растительных и животных организмах*

Согласно В.И. Вернадскому, из общего количества брома, имеющегося в земной коре,  $1/100$  часть его связана с живым веществом, при этом ежегодно в биологическую миграцию вовлекаются миллионы тонн элемента. По интенсивности поглощения биомассой галоген относится к I группе веществ, поскольку концентрация его в золе больше, чем в земной коре (Филов, 1988).

Морские растения и животные характеризуются более высокими уровнями накопления галогена, чем наземные. Некоторые водоросли, в том числе пресноводные, способны накапливать в себе элемент в 80 000 раз больше его содержания в водной среде. В красных водорослях были выделены различные бромсодержащие соединения, обладающие биологической активностью (Саенко, 1992). Согласно Иванову (1996) количество брома в наземных растениях варьирует от 0,002 до 120 мг/кг, по данным Кабата-Пендиас (1989) природные концентрации галогена в наземных растениях не превышают 40 мг/кг, а более высокие его содержания могут указывать на наличие загрязнения. В.А. Филов (1989) отмечает, что количество брома в фитомассе континентов составляет около 9 млн. тонн. Установлено, что больше брома содержится в листьях растений, чем в их корнях, при этом концентрация элемента не зависит ни от его содержания в почвах, ни от типа почв, ни от величины pH. Однако интересным является тот факт, что растения легко извлекают бром из почв, обогащенных им, но способ его переноса пока не известен. Роль воздушного поступления брома в растениях изучена крайне слабо, однако некоторые авторы отмечают его поступление с атмосферным воздухом (Филов, 1988). Накапливаясь в клетках растений, элемент меняет свои формы нахождения: вместо неорганических солей, обнаруживаемых в почвах и водах, в растениях он встречается в виде сложных органических соединений (Розен, 1970).

Содержания элемента в организме млекопитающих варьируют в широких пределах: от 6 мг/кг в наземных животных до 1000 мг/кг в морских (Иванов, 1996). Отмечается, что в организме млекопитающих нет депо, где концентрируется бром (Верховская, 1962). Изучение форм химического существования элемента показывает, что в животных организмах бром может находиться в ионной и белковосвязанной формах, а также в виде HBr и различных бром-органических соединений (Верховская, 1962; Розен, 1970). Результаты исследований показывают, что высокие содержания брома могут отмечаться в щитовидной железе животных, а также в гипофизе, причем в последнем содержание галогена не постоянно (Войнар, 1960).

В целом же, изучение особенностей накопления брома в животных организмах демонстрирует идентичный характер его распределения, уровень содержания и диапазон его колебаний по органам и тканям различных млекопитающих (Верховская, 1962).



Подробные содержания брома в животных и растительных организмах показаны целым рядом авторов, как российских, так и зарубежных: *А. Виноградов, Л. Селиванов, А. Симорин, А. Нейфельд, А. Дамиен, С. Блейнан, Г. Гофман, И. Верховская, А. Кабата-Пендиас, Б.Я. Розен* и многие другие. В таблице 2.5 представлен краткий обзор по содержанию брома в животных и растениях.

**Таблица 2.5** – Содержание брома в растениях и животных, мг/кг

Объект	Пункт наблюдения	Содержание	Источник
Микроорганизмы минеральных источников	Байкальская рифтовая зона	3,9–17,4	Перминова, 2013
Растения суши	–	9,5–19	Полянский, 1980
	–	1–276	Барановская, 2011
Морские растения	–	до 1000 сухой массы	Кабата-Пендиас, 1989
	–	203–1004	Саенко, 1992
Морские водоросли	–	0,01–1000 в пересчете на сухое вещество	Розен, 1970
Водоросли, ламинарии	–	400 на живой вес	Перельман, 1979
Губки	–	до 2500 на сухое вещество	
Морские животные	–	60–1000	Иванов, 1996
Наземные животные	–	6	
Кишечнополостные	–	0,11–0,354	Войнар, 1960
Черви	–	0,0195	
Оболочники	–	0,05–0,22	
Мягкотелые	–	0,05–0,22	

#### *Бром в организме человека*

Подобно животным, в организме человека не наблюдается специфичного органа-концентратора брома (*Верховская, 1962*). Элемент попадает в организм, главным образом с пищей, питьем и воздухом и концентрируется в различных органах и тканях (*Верховская, 1962; Полянский, 1980*). Согласно *В.В. Иванову (1996)* в человеческий организм поступает около 7,5 мг брома в сутки, по данным *Дж. Эмсли (1991)* – от 0,8 до 24 мг, выделение происходит, в основном, с мочой – 7 мг по данным *В.В. Иванова (1996)* и 1–2,5 мг по *А.И. Войнару (1960)*. Небольшое количество элемента может также элиминироваться с калом, потом, слюной и молоком, а также возможно, с желудочным соком. Скорость экскреции брома в значительной степени зависит от содержания хлоридов в организме: при их низком содержании наблюдается аккумуляция брома и его пониженное выделение с мочой (*Авцын и др., 1991*). Общее содержание Br в организме составляет примерно 200 мг, причем 170 мг – в мягких тканях. Всасывание галогена из желудочно-кишечного тракта равно 1, порог почечной проницаемости – 0,1 мг %. Общий период

выведения брома из организма составляет в среднем 10 суток (*Иванов, 1996*). Отмечается, что бром довольно долго задерживается в крови и практически не включается в обмен (*Филов, 1988*).

Содержание Br в организме не связано ни с половой принадлежностью, ни с возрастными характеристиками (*Верховская, 1962*). Повышенные его содержания обычно отмечаются в щитовидной железе, чуть меньше – в крови. Однако, в слизистой желудка и мозговом слое почек, количество этого элемента иногда может быть выше, чем в щитовидной железе. Среднее содержание галогена характерно для таких органов, как печень, селезенка, надпочечники, корковый слой почек, периферические нервы и гипофиз. Печень является основным органом, в котором наблюдается разрушение сложных органических соединений брома таких как, например,  $\alpha$ -бром. Низкие количества элемента обнаруживаются в различных отделах центральной нервной системы. Содержание брома в гипофизе ниже, чем в крови, но выше, чем в других отделах мозга. Меньше всего брома было зафиксировано в скелетных мышцах (*Войнар, 1960*). Согласно *P. Quittner (1970)* и *Ю.Е. Саен (1990)* бром является одним из часто встречаемых элементов в волосах, где он может накапливаться в довольно высоких концентрациях. Более подробная информация по особенностям накопления брома в органах и тканях организма человека представлена в таблице 2.6.

Имеются данные о том, что при острых приступах ревматизма у детей количество брома в крови увеличивается, тогда как при улучшении состояния его уровень снижается (*Верховская, 1962*). Кроме того, отмечается, что нормальное содержание брома в крови значительно уменьшается на определенных стадиях маниакально-депрессивных психозов.

При введении соединений брома в терапевтических целях, его содержание в крови, а также в других тканях и органах, увеличивается и может достигать довольно высоких значений. Бром, применявшийся для таких целей, затем довольно медленно выводится из организма. Так, например, при однократном введении бромистых солей наибольший уровень брома в крови наблюдается через 2–3 часа и сохраняется на протяжении 48–120 часов, последующее его снижение может не закончиться и через 19 дней.

### **2.3.1 Бром в продуктах питания**

Так как большая часть брома попадает в организм с пищей (*Войнар, 1962; Верховская, 1962*) и в связи с тем, что элемент находит применение в пищевой промышленности (см. таблицу 2.1), изучение его в пищевых продуктах является необходимой и крайне важной задачей. К сожалению, в отечественной литературе сведения о содержаниях элемента в продуктах питания крайне скудны, немного более подробная информация доступна в работах зарубежных авторов, однако указанные данные не являются исчерпывающими.

Таблица 2.6 – Содержание брома в организме человека, мг/кг

Объект	Пункт наблюдения	Содержание	Автор	Объект	Пункт наблюдения	Содержание	Автор	
Кровь	–	4,7	Эмсли, 1993	Головной мозг		0,5–1,7	Иванов, 1996	
	–	1,6–15	Войнар, 1960		Ядро ЦНС	–	0,076 мг/г	Zheng et al., 1992
	–	1,1–20	Верховская, 1962		Митохондрии	–	< 0,030 мг/г	
	–	2,7	Иванов, 1996		Миелин	–	0,187 мг/г	
	Узбекистан	18	Zhuk et al., 1988		Синапсом	–	< 0,0321 мг/г	
	Бангладеш	1,1	Khan, 1980		Сердце	–	10	Росляков, 1983
–	0,2–20	Quittner, 1970	г.Анапа (зола)	78,8		Собств.исслед.		
Волосы	–	5,0	Росляков, 1983	Селезенка	–	20	Росляков, 1983	
	–	0,65–53,3	Иванов, 1996		–	9–15	Войнар, 1960	
	–	12,5	«Человек...», 1977»	Почки	–	6,7	Иванов, 1996	
	Томская об.	13,3	Наркович, 2012		–	10	Росляков, 1983	
	Зап.Сибирь	2,7 – 13	Барановская и др., 2015	Костная ткань	–	7	Иванов, 1996	
	–	2,37 ± 0,7	Сагет, 1990		–	38		
	Польша	2,7			–	6,7		
	Бельгия	3,0		Мышечная ткань	–	7,7	Эмсли, 1993	
	США	8,0		Легкие	–	30	Росляков, 1983	
	Канада	0,2–21			–	7,5	Иванов, 1996	
	Южная Корея	3,5	Zaichick, 2010	Аорта	–	390		
	Япония	7,0	Chiu et al., 2011		–	20–25	Войнар, 1960	
	Россия	3,59 ± 2,33	Зайчик, 2004	Надпочечники	–	14–18		
	Тайвань	8,44 ± 2,16			–	–	–	
	Сводка по миру	0,0045–880						
Щитовидная железа	–	7,7	Верховская, 1962	Яичник	–	5,1	Иванов, 1996	
	–	0,9–1,4	Войнар, 1960	Ногти	–	9–10		
	–	10	Росляков, 1983	Предстательная железа	–	360		
	–	3	Иванов, 1996					
Печень	–	6–7,5	Войнар, 1960	Зубы	–	1,1–34		
	–	10	Росляков, 1983					

Стоит отметить, что на сегодняшний день в России отсутствуют нормативные критерии для брома в продуктах питания, о чем более подробно изложено в разделе «*Гигиенические нормативы*». По нормам ВОЗ, уровень допустимой суточной дозы потребления брома составляет 1 мг в сутки на 1 кг массы тела. Однако, как показывают изученные нами данные, потребление брома в разных странах мира превышает этот показатель (таблица 2.7).

**Таблица 2.7** – Ежедневное потребление брома с пищей в разных странах (мг/кг/ день)

Страна	Вг, мг/кг/день	Максимально допустимое, мг/кг в сутки массы тела (ВОЗ)	Источник
Германия	2,5	1	Hou, 1997
Китай	5,4		Mannan, 1992
	2,28		Hou, 1997
Нидерланды	8		Van Dokkum, 1989
Пакистан	4,74		Hou, 1997
США	2-8		WHO, 1971
Турция	2,71		Hou, 1997
Украина	3,5		Shiraishi, 1999
Япония	11,4		
	8-12		Matsuda, 1994

Основным источником поступления элемента в организм человека является поваренная соль (*Верховская, 1962*), также серьезным источником его в питании может выступать метилбромид и другие органические соединения брома, используемые для фумигации почвы, зерна и плодов (*Кабата-Пендиас, 1989*). Установлено, что влияние элемента на различные виды растений, потребляемых в пищу, неодинаково. Например, картофель, шпинат, сахарная свекла являются чувствительными к воздействию брома, тогда как морковь, табак, томаты, сельдерей и дыня могут накапливать большое количество элемента без видимых эффектов.

*Полянский (1980)* отмечает, что в пище может содержаться от 0-260 мг/кг брома. Изученные нами литературные данные, представленные в таблице 2.8, демонстрируют содержания брома в продуктах, употребляемых в пищу жителями разных стран.

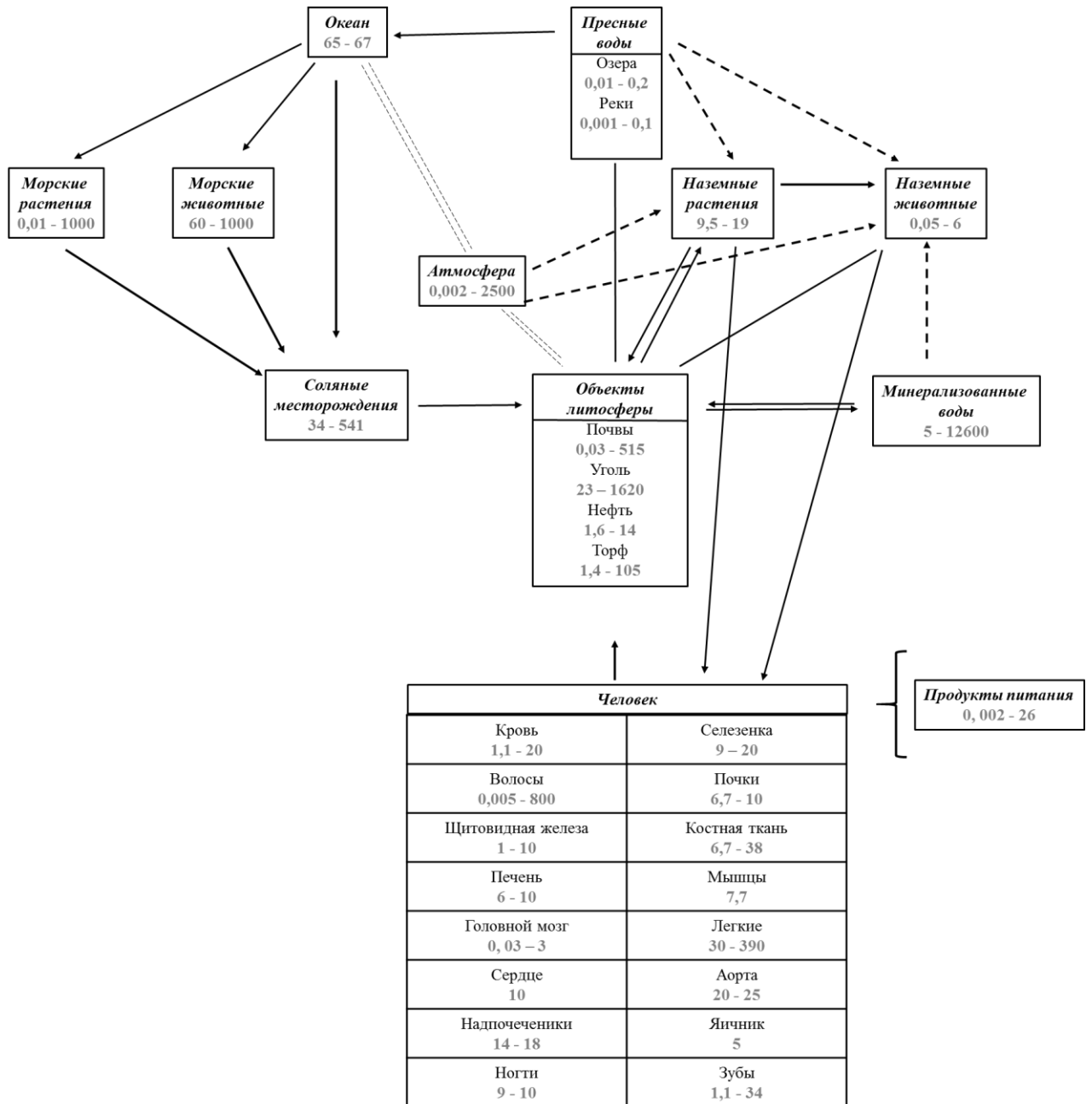
Помимо поступления брома в организм человека с пищевыми продуктами, важное значение имеют также и другие аспекты образа жизни, например, курение. В табаке отмечаются повышенные содержания элемента. Так, например в табаке Финляндии было обнаружено в среднем 110 мг/кг брома, при максимуме – 200 мг/кг, при этом в твердых частицах сигаретного дыма – 1 мкг/сиг., в газовой фазе – 5 мкг/сиг. (*Hasanen et al., 1990*). В индийском табаке было обнаружено 110-165 мг/кг брома (*Mishra, Shaikh, 1983*), в табаке США – 36 – 154 мг/кг (*Nadkarni, Ehmman, 1969*), Ирана 108 – 206 мг/кг (*Abedinzadeh, Parsa, 1973*), Египта – 158 мг/кг, причем в пепле этой же сигареты – 481 мг/кг (*Iskander, 1985*). Отмечается, что допустимый уровень в табаке не должен превышать 250 мг/кг (*Ahmad et al., 1979*).

Таблица 2.8 – Содержание брома в продуктах питания, мг/кг

Продукты питания		Содержание	Страна	Источник	Продукты питания		Содержание	Страна	Источник
Молочные продукты	молоко	2,57	Украина	Ko, 2006	Овоици	в целом	3,00	Китай	Hou, 1997
		3,70	Япония			свекла (ботва)	0,15 ± 0,02	–	Gunther, 1966
		1,73	Китай	Капуста		5,3 ± 0,5	Пакистан	Waheed, 2003	
		10,3 ± 0,9	Пакистан	цветная капуста		6,4 ± 0,6			
	3,6	–	De Vos, 1984	брокколи		0,13 ± 0,01	–	Gunther, 1966	
Яйца	5,51	Китай	Hou, 1997	кукуруза		0,51 ± 0,02	–		
	7,3 ± 0,5	Пакистан	Waheed, 2003			0,9–1,7	–	Кабата-Пендиас, 1989	
Мясо	в целом	4,18	Китай	Hou, 1997		огурец	10-20		–
	говядина	0,83 ± 0,07	Пакистан	Waheed, 2003			9,91 ± 0,05	–	
	баранина	0,58 ± 0,05				лук	0,18 ± 0,01	–	
	курица	1,3 ± 0,1			2,4 ± 0,2		Пакистан	Waheed, 2003	
Морепродукты	7,83	Китай	Hou, 1997	перец	0,18 ± 0,01	–	Gunther, 1966		
в целом	1,59				7,33 ± 0,94	Египет	Awadallah, 1986		
Зерновые	ячмень	0,34 ± 0,02	–	Gunther, 1966	томат	10,3 ± 0,1	Пакистан	Waheed, 2003	
		2,1–6,4	–	Kabata-Pendias, 2011		10	–	Kabata-Pendias, 2011	
	пшеница	2,41	Иран	Pourimani, 2013	редис	0,10 ± 0,01	–	Gunther, 1966	
		6,71	Саудовская Аравия	Al-Dayel, 2002		7,7 ± 0,6	Пакистан	Waheed, 2003	
		12,5	Индия	Kulkarni, 2009		24–26	–	Kabata-Pendias, 1989	
		8,04	США	Iskander, 1986a	цуккини	0,13 ± 0,01	–	Gunther, 1966	
		0,80 ± 0,08	Пакистан	Waheed, 2003		репа	6,6 ± 0,6	Пакистан	Waheed, 2003
	рис	0,64 ± 0,06			баклажан	24,2 ± 1,7	Пакистан		
	овес	3,1	–	Kabata-Pendias, 2011	3,78 ± 0,26	Египет	Awadallah 1986		
	Фрукты	в целом	0,16	Китай	Hou, 1997	картофель	2,19	Китай	Hou, 1997
1,1			Ямайка	Howe, 2005	1,3 ± 0,1		Пакистан	Waheed, 2003	
0,7			Англия		3,92 ± 0,23		Египет	Awadallah, 1986	
апельсин		0,04	–	Kabata-Pendias, 2011	4,2–14,3		–	Kabata-Pendias, 1989	
яблоко		0,002	–		2,7–14,2		–	Войнар, 1960	
Сахар	0,44	Китай	Hou, 1997	бобовые	1,91	Китай	Hou, 1997		
Вино	0,06				0,57	Ямайка	Howe, 2005		
Хлеб	0,9–6,1	–	Войнар, 1960	укроп	3,70 ± 0,19	Египет	Awadallah, 1986		

## 2.4 Общие закономерности накопления и распределения брома в компонентах биосферы

Обзор литературных данных демонстрирует, что распределение брома в компонентах биосферы (рис. 2.3) является неоднородным. Для природных систем по степени концентрации брома можно представить следующий ряд: на первое место выходят компоненты гидросферы с максимальным содержанием элемента в составе минеральных вод – до 12600 мг/л. На второе место можно поставить угли, концентрация элемента в которых достигает 1620 мг/кг. На следующем месте располагаются морские растения и животные (максимум содержаний – 1000 мг/кг).



**Рисунок 2.3** – Упрощенная схема распределения брома в окружающей среде в рамках круговорота элемента в природе по данным литературного обзора, в мг/кг (для объектов гидросферы – в мг/л, для атмосферы – в нг/м<sup>3</sup>)

Организм человека по концентрации галогена стоит на четвертом месте, а не в конце, как это предполагает пищевая цепочка. Максимальные содержания брома, с его резкой вариативностью, определяющие данное положение, характерны для депонирующих сред, к которым относятся, в частности, волосы (Кист, 1987). Далее располагаются наземные растения и животные. Самыми низкими содержаниями элемента характеризуются речные воды (от 0,001 мг/л) и атмосферный воздух (2500 нг/м<sup>3</sup>).

*Таким образом, с геоэкологической точки зрения бром, несомненно, представляет особый интерес. Элемент характеризуется высокой химической активностью и миграционной способностью, что во многом определяет особенности его поведения в окружающей среде. Биологическое действие брома носит двойственный характер: с одной стороны, элемент является эссенциальным, с другой, он может быть чрезвычайно токсичным, оказывая отрицательное воздействие на важнейшие физиологические функции живых организмов и участвуя в развитии и образовании некоторых заболеваний. Серьезного внимания требует также вопрос о техногенном поступлении брома и особенностях его техногенной концентрации в различных компонентах окружающей среды.*

### ГЛАВА 3. СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Современный уровень развития общества характеризуется повышенным негативным воздействием на окружающую среду (ОС), результатом которого является нарушение динамического равновесия и степени устойчивости природных систем, а также баланс их взаимодействия и нормального функционирования (Ермаков, 2009). Как следствие, это приводит к ухудшению качества среды обитания и условий проживания человека (Саев и др., 1990; Абдуллин и др., 2009; Гроббе и др., 2009; Тегакто, 2013; Челноков и др., 2015 и др.). На сегодняшний день в ряде регионов России и зарубежья экологическая обстановка является неблагоприятной, а загрязнение окружающей среды – высоким, и порой, критичным (Mage et al., 1996; Келлер, Кувакин, 1998; Mayer, 1999; Квашина, 2001 и др., Моисеенко, 2009). При этом отмечается четкая тенденция между повышением уровня загрязнения окружающей среды и ростом заболеваемости («Экология...», 1994, Сенотрусова, 2005; Сухих, 2005; «Эколого-геохимические...», 2006; Белан, 2007; «Качество воздуха...», 2009; Витрищак и др., 2010; Clarke et al., 2010; Овсянников и др., 2011; Сосунова, 2013; Lee et al., 2014; ВОЗ, 2016 и др.). Сложная экологическая напряженность диктует необходимость разработки мер, направленных на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Однако, для принятия эффективных решений, необходимо иметь четкое представление о существующих на сегодняшний день методах, подходах, концепциях, моделях оценки экологического состояния окружающей среды, применяющихся в мире, ввиду отсутствия единичной градации и структуры существующих методов экологической оценки.

В качестве основного критерия качества ОС как в нашей стране, так и за рубежом выступают **экологические и гигиенические нормативы** (Исидоров, 1997; Егорова, 2003; Языков, 2003; Moeller, 2005; *Essential environmental...*, 2008), которые рассматриваются как гарантия безопасности среды для здоровья населения (Александрова, 1990). Интересно, что первые упоминания о нормировании антропогенных воздействий на природную среду мы находим еще в Древнем Вавилоне и Индии (Павлов, Пешкова, 2006). Однако, правовая система в виде указов и законов, регулирующая допустимую антропогенную нагрузку, была сформирована только к началу XX века. Впервые концепция нормирования была разработана в СССР, а затем в США и других странах мира (Александрова, 1990).

Нормативы качества ОС устанавливаются, в целом, для обеспечения экологического благополучия: сохранения естественных природных экосистем, генетического фонда некоторых популяций растений, животных и других организмов, а также в интересах охраны здоровья человека (Пименова, 2009). К ним относятся: нормы предельно – допустимых концентраций



(ПДК) и предельно – допустимый уровень (ПДУ). В последнее время вместо ПДК и ПДУ широко применяется термин «максимально-допустимый уровень». Кроме того, в тех случаях, когда ПДК или ПДУ не определены, используют также и другие показатели: временная допустимая концентрация (ВДК), ориентировочно допустимая концентрация (ОДК), ориентировочно безопасный уровень воздействия (ОБУВ), а также ориентировочно допустимый уровень (ОДУ) (Пименова, 2009). Нормативы допустимого воздействия на окружающую среду устанавливаются в соответствии с показателями воздействия хозяйственной и иной деятельности на ОС при соблюдении нормативов качества ОС. К ним относятся: предельно допустимые выбросы (ПДВ) и предельно- допустимые сбросы (ПДС), а также временно согласованные выбросы и сбросы. При этом, как показывает исследование *З.И. Жолдаковой и О.О. Симициной (2004)*, отмечается высокое совпадение между отечественными и иностранными нормативами, что указывает на международное единство фундаментальных принципов нормирования химических элементов и веществ.

Несмотря на широкое применение экологических и гигиенических нормативов, они подвергаются серьезной критике, которая, как стоит заметить, началась практически сразу после их юридического утверждения (*Баитан и др., 1941; Павлов, Пешикова, 2006*). Среди многочисленных недостатков системы экологического нормирования, мы выделим всего несколько: 1) отсутствие предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ и др. для некоторых компонентов окружающей среды и продуктов питания; 2) отсутствие учета многофакторности воздействия химических веществ, т.е. различных путей их поступления (с воздухом, пищей, через кожу). К другому, одному из наиболее существенных, на наш взгляд, недостатков экологических нормативов относится отсутствие учета пространственно-географической дифференциации территории, т.е. не учитываются ее природные особенности (естественный фон, климат и др.). Широко известен тот факт, что поведение химических элементов на различных территориях не одинаково, и это в значительной степени определяет их эффект на живые организмы (*Лиманова, 2015*). Особенно это актуально для территорий с избытком/недостатком определенных химических элементов, а также для зон с ярко выраженным техногенным вмешательством, где фиксируется серьезное перераспределение химических элементов во всех компонентах окружающей среды и изменение их естественных фоновых концентраций. Таким образом, можно заключить, что все вышеперечисленные недостатки, в той или иной степени, могут ограничивают использование данного метода в качестве основного инструмента экологической оценки.

Широко распространенным методом оценки состояния ОС являются исследования, основанные на изучении химического анализа отдельных компонентов окружающей среды или

их совокупности, а также тканей и органов живых организмов (*Ковальский, 1974; Глазовская, 1988; Саэт и др., 1990; Алексеенко, 2006; Рихванов и др., 2006; Язиков и др., 2010; Страховенко, 2011; Барановская и др., 2015*). Они могут носить разные названия: *геохимические, эколого-геохимические исследования или мониторинг* и др., но, по сути, представляют собой одинаковый подход к изучению состояния окружающей среды. При этом если в контексте геохимических/эколого-геохимических исследований возможно изучение отдельных компонентов природной среды, то под мониторингом подразумевается комплексное изучение, т.е. совокупность природных объектов (*Язиков, 2006*). Стоит также отметить, что в работах иностранных исследований мы не находим терминов «геохимические и эколого-геохимические исследования, подобного рода работы именуется, в общем, мониторингом окружающей среды (environmental monitoring).

Большой вклад в развитие данного направления в нашей стране внес Ю.А. Саэт с соавторами (1990) на основе уже существующих разработок В.И. Вернадского, А.П. Виноградова, В.В. Ковальского. Важное значение имели также работы А.И. Перельмана, В.В. Иванова, М.А. Глазовской, В.А. Алексеенко, сотрудников Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии ВСЕГИНГЕО, Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН и др. (*Язиков, 2006*).

Объектом исследования в эколого-геохимических/геоэкологических работах выступает окружающая среда, изменяющаяся под влиянием природных и антропогенных факторов на различных уровнях: от локального до глобального (*Розанов, 2015*). Основной целью является изучение закономерностей распространения, миграции, концентрации химических элементов в окружающей среде, в природных, природно-техногенных и техногенных ландшафтах, выявление пространственно-временных особенностей распределения химических элементов, взаимосвязей деятельности человека с окружающей средой в целом и отдельными ее компонентами, связей между природными и антропогенными факторами окружающей среды и живыми организмами, здоровьем населения и мн.др. (*Саэт и др., 1990; Тимашев, 2007*). В наиболее полной мере общие методологические принципы проведения данных исследований отражены в работе *Е.Г. Язикова (2006)*.

Эколого-геохимические/геоэкологические исследования опираются на междисциплинарный подход, т.е. научно-методическую основу различных областей наук: биологии, физики, экологии, химии, ландшафтоведения, географии и др., в связи с чем они отличаются использованием значительного количество различных аналитических,

математических методов анализа, методов картографирования, экологического моделирования, ГИС–технологий и мн.др (Гагина, Федорцова, 2002).

Широкое распространение такие исследования получили для изучения воздействия промышленных предприятий на окружающую среду (Рихванов, 1997; Экология ..., 1994; Куролан, 1998; Барановская, 2003; Язиков, 2006; Жорняк, 2009; Li et al., 2009; Nadal et al., 2009; Wei et al., 2010; Nadal et al., 2011; Барановская, 2011; Солтанмурадова и др., 2012; Воробьева, Прохорова, 2015; Филимоненко, 2015; Ялалтдинова, 2015), а также ранжирования территорий для выявления территориальных различий степени экологической напряженности (Атлас..., 1995; Гамм, Калиев, 2004; Кириллов, Половинкина, 2011; Дубровская, 2014; Ермолаева и др., 2014; регионы и города России..., 2014).

Однако, как показывает практика, все больший интерес представляют исследования, ориентированные не только на ранжирование территорий в соответствии с их экологическим состоянием, а, прежде всего, согласно степени их экологической устойчивости с применением агрегированных интегральных индикаторов (Бакуменко, Коротков, 2008). В качестве примера использования экологических индикаторов на международном уровне можно привести **«индекс живой планеты»** (Living Planet Index), использующийся для оценки состояния природных экосистем. В рамках данного индекса измеряются несколько показателей: природный капитал лесов, водных экосистем и др., каждый из которых отражает изменение популяции в экосистеме. Другим примером является **«индекс экологической устойчивости»**, именуемый в англоязычной литературе как Environmental Sustainability Index, охватывающий свыше 20 факторов, способных влиять на экологическую устойчивость (качество атмосферного воздуха, воды, уменьшение выбросов и отходов, управление природными ресурсами и мн. др.). В России также проводится ряд исследований по данной тематике (Айвазян и др., 2006; Шихова, 2007; Бакуменко, Коротков, 2008 и др.). Кроме того, на национальном уровне, в контексте «Концепции перехода РФ к устойчивому развитию» была создана система, включающая 42 индикатора, из которых 21 состоит в разделе экология (атмосфера, биоразнообразие, пресная вода и т.д.), рассчитывающихся на основе официальных статистических данных. Однако, эта система пока не нашла широкого распространения ввиду отсутствия широкой региональной базы данных.

Проанализировав опыт Европейских стран (Старостина, Уланова, 2013) можно заключить, что все методы, ориентированные на экологическую оценку ОС можно разделить на две категории: процедурные и аналитические. К первым относятся методы, рассматривающие социальные и экономические аспекты наряду с экологическими. В данную группу включены: оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС), известную в англоязычной литературе как Environmental Impact Assessment (EIA); стратегическая экологическая оценка (СЭО) или Strategic

environmental assessment (SEA), а также система экологического менеджмента (СЭМ) – Environmental management system (EMS). Вторая категория методов сосредоточена, преимущественно, на технической составляющей и включает: анализ материальных потоков или Material flow analysis (MFA); анализ потока вещества – Substance flow analysis (SFA); оценка экологического риска – Environmental Risk Assessment (ERA), анализ «затраты – выгоды» – Cost-benefit analysis (CBA) и оценка жизненного цикла – Life Cycle Assessment (LCA).

Кроме того, в ходе проведенного нами исследования (*Perminova et al., 2016*), было также обнаружено, что все указанные выше методы, наряду с несколькими дополнительными (экологический след – Ecological Footprint и др.) зачастую встречаются в рамках систематического экологического анализа и широко используются не только в пределах стран Европейского союза, но и практически во всем мире. При этом самыми часто используемыми из них являются только четыре метода, которые будут рассмотрены нами более подробно: оценка воздействия на окружающую среду, экологический след, анализ материальных потоков и оценка жизненного цикла.

**Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС)** представляет собой метод, направленный на оценку степени влияния любого вида намечаемой хозяйственной или иной деятельности на окружающую среду и здоровье человека. Данный термин был введен Международной ассоциацией по оценке воздействия на окружающую среду – *International Association for Impact Assessment* в 1970-х годах в США (*Старостина, Уланова, 2013*). Чуть позже процедура ОВОС начала использоваться в системе принятия решений и других стран (Канада, Великобритания, Германия, Франция и др.). В России же официальным началом ОВОС считаются 1980-е годы, когда Государственным комитетом было введено требование об обязательном предоставлении на государственную экологическую экспертизу информации о результатах оценки воздействия намечаемой деятельности на ОС (*Данилова, Каримова, 2015*).

В настоящее время процедура ОВОС обязательна и является частью системы экологической оценки, как в пределах РФ, так и за рубежом, однако подходы к ее проведению в разных странах имеют ряд отличительных особенностей (*Данилова, Каримова, 2015*). В России проведение данной оценки для всех видов намечаемой деятельности предусматривается Федеральным законом «Об экологической экспертизе» (*Федеральный закон...*).

**Экологический след** – метод (зачастую определяется как индикатор или показатель устойчивого развития), позволяющий определить уровень нагрузки на природную среду в условиях антропогенной деятельности в масштабе отдельного человека, определенной группы людей, предприятия, населенного пункта, страны и даже населения всей планеты (*Мустафаев, 2015*). Идея создания данного метода (1992 год) принадлежит канадскому ученому–экологу

Уильяму Ризу, под руководством которого по этой тематике была написана диссертационная работа. Вскоре после написания автором книги «Наш экологический след: Снижение антропогенного воздействия на Землю», метод получил очень широкое распространение (*Perminova et al., 2016*).

«Экологический след» основывается на измерении потребления населением различных видов ресурсов (продовольствие, материалы) в эквиваленте площади моря и биологически продуктивной земли, необходимых для производства потребляемых ресурсов и переработки образующихся отходов. Измерение потребления энергии осуществляется в эквиваленте площади, необходимой для адсорбции соответствующих выбросов диоксида углерода (*Бакуменко, Коротков, 2008*). Как показывают исследования, современный уровень потребления ресурсов человечеством значительно превышает потенциал Земли, т.е. способность природы к восстановлению, а экологический след населения Земли вырос более чем в три раза с 1960–х годов (*Бакуменко, Коротков, 2008*).

Стоит отметить, что на сегодняшний день отмечается значительное количество работ по расчету экологического следа (*Santamouris et al., 2007; Bagliani et al., 2008; Denholm, Margolis, 2008; Siche et al., 2008; Hoekstra, 2009; Hong et al., 2009 и мн.др.*). Интерес к данному методу проявляют и отечественные исследователи (*Мозговая, 2007; Бакуменко, Коротков, 2008; Кулясов, 2014; «Экологический след...», 2014; Мустафаев, 2015*).

Достаточно полную картину об источниках и объемах выбросов загрязняющих веществ в ОС дает метод **анализа материальных потоков**, основанный на количественной информации о входящих (вода, сырье, энергия) и выходящих потоках системы (выбросы в ОС, отходы). Данный метод может применяться на уровне отдельного предприятия, либо их совокупности, города, регионы, страны и др. (*Perminova et al., 2016*). Основоположником этого метода считается американский ученый русского происхождения В.В. Леонтьев, впервые применивший его в рамках экономического анализа. Однако, как мы видим из современных исследований, метод нашел широкое применение в оценке состояния окружающей среды. Основанный на построении системы уравнений материального баланса, данный метод позволяет оценивать эффект воздействия промышленных предприятия любой отрасли на ОС: спрогнозировать и наглядно отобразить потенциальные объемы выбросов, сбросов, отходов, а также объекты загрязнения (*Филькин и др., 2012*). Согласно ГОСТ Р ИСО 14051–2014 анализ материальных потоков выступает инструментом управления, который может использоваться для лучшего понимания возможных экологических последствий в связи с использованием материалов и энергии, а также для совершенствования экологических показателей.

В отличие от работ зарубежных исследователей, активно использующих данный метод для оценки качества окружающей среды в целом (*Bailey et al., 2004; Suh, 2004; Sendra et al., 2007; Matsubae–Yokoyama et al., 2009 и др.*), в России наблюдаются лишь единичные примеры его использования, причем преимущественно, в контексте проблемы обращения с отходами (*Тагилова, 2006; Филькин и др., 2012; Старостина, Уланова, 2013*).

Другой метод оценки состояния окружающей среды – метод **оценки жизненного цикла**, является одним из ведущих инструментов менеджмента Европейских стран, основанным на серии стандартов ISO (*ISO 14040 “Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework”*). В рамках данного метода возможна экологическая оценка систем производства продукции и утилизации отходов на всех этапах жизненного цикла: добыча природных ресурсов/сырья, производство товара, его транспортировка, потребление/использование, утилизация/размещение в окружающей среде, а также все возможные промежуточные этапы (*Старостина, Уланова, 2013*). Таким образом, анализируется вся совокупность последовательных и взаимосвязанных звеньев производственной цепочки.

Первое исследование оценки жизненного цикла было проведено в США всемирно известной компаний «Coca-Cola» в 1969 году при сравнении разных видов упаковочных материалов. Однако, сам термин «оценка жизненного цикла» был предложен Обществом экологической токсикологии и химии (SETAC) только в 1990–м году (*Старостина, Уланова, 2012*). В России метод приобрел известность с принятием международных стандартов в конце 1990–х годов – ГОСТы Р ИСО 14040–14043 (*Притужалова, 2007*). Оценка жизненного цикла происходит в четыре этапа:

I. Определение цели, задач и области применения;

II. Инвентаризационный анализ : определение входных (вода, сырье, энергия) и выходных (выбросы в окружающую среду, отходы) потоков;

III. Оценка воздействия на окружающую среду, осуществляющаяся на промежуточной (Midpoint) и конечной (Endpoint) стадиях, каждая из которых включает определенные категории воздействия (рисунок 3.1);

IV. Оценка (интерпретация) полученных результатов.

Стоит отметить, что данный метод является наиболее часто используемым в рамках современных экологических исследований (*Perminova et al., 2016*). На данный момент большее распространение он имеет в работах зарубежных исследователей, однако, значительный интерес к работам в данном направлении в последнее время проявляют и российские ученые (*Сергиенко, Копыльцова, 2011; Старостина, Уланова, 2012; Омельченко, Бром, 2013; Елисеева, 2014; Маслеева, Пачурин, 2014; Ялалтдинова, 2015 и мн.др.*).



**Рисунок 3.1** – Общая схема категории воздействия в рамках анализа жизненного цикла  
(рисунок сделан автором на основе Jolliet et al., 2003)

Все более важное значение в экологических исследованиях сегодня приобретает новое направление – **оценка экологических рисков**, представляющая собой междисциплинарный научный подход, объединяющий специалистов разных областей: экономики, биологии, химии и мн.др. (Гнедая и др., 2007). Развитие оценки экологических рисков впервые началось в США во второй половине 20 столетия. В 1980 г. было организовано The Society for Risk Analysis – крупнейшее в мире международное общество по анализу риска, а в 1986 г. Агентством по охране окружающей среды США (EPA) была разработана серия документов, посвященных процедуре проведения оценки риска. В России работы в этой области начались в начале 1980–х гг., однако серьезное развитие данное направление в нашей стране получило только после Чернобыльской аварии (Шмаль, 2010). Правовая основа применения оценки рисков в РФ предусмотрена постановлением от 10.11.97 «Об использовании методологии оценки риска для управления качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации».

Основной целью оценки экологических рисков является оценка степени и характера воздействия природных и антропогенных факторов на состояние окружающей среды, живые организмы, в том числе здоровье человека. В оценке экологических рисков выделяют два подхода: экосистемный и санитарно-гигиенический (Хабарова, 2016). Под первым

подразумевается, что под воздействием природных и антропогенных факторов объектами риска являются естественные экологические системы в единстве их биотических и абиотических компонентов. Сущность второго заключается в том, что главными объектами риска под влиянием неблагоприятных факторов является организм человека.

Оценка экологических рисков базируется на выявлении и прогнозировании вероятности развития неблагоприятных эффектов, связанных с факторами среды обитания. Таким образом, она позволяет качественно и количественно оценивать уровни риска для здоровья населения (*Досмагамбетова и др., 2014*), а также предусматривать меры по снижению рисков на экологически напряженных территориях (*Гнедая и др., 2007*).

Стоит отметить, что методология оценки экологических рисков активно используется исследователями многих стран (*Wcisło et al., 2002; Gammon et al., 2005; Jiang et al., 2005; Cunningham et al., 2009; McKenzie et al., 2012 и мн.др.*), в том числе широко распространена в России (*Иванова и др., 2006; Янкович и др., 2011; Мусихина, 2012; Осипова и др., 2013 и мн.др.*) для решения природоохранных задач и управления экологической ситуацией в целом (*Припутина, Башкин, 2012*).

Достаточно новым подходом к оценке состояния природной среды являются **методы математического моделирования экологических систем** или **экологическое моделирование**, широко применяющееся как в рамках оценки экологических рисков, так и в контексте других аспектов, например, анализа закономерностей функционирования экологических сообществ, прогнозирования динамики экосистем (*Абакумов, 2006; Роговая, 2007; Завалишин, 2009; Кондратьева и др., 2013*). Интенсивно разрабатываются в последнее время модели, способные прогнозировать глобальные климатические изменения, как, например, модель IMAGE – Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect (*Кахраманова, 2012*).

В связи с тем, что экологическое моделирование, как научный подход, используется для самых разнообразных целей, не существует единой классификации экологических моделей. Согласно *Абакумову (2006)*, выделяется три класса моделей: 1. Описательные; 2. Качественные (направленные на изучение динамических особенностей и способные воспроизводить динамические эффекты в поведении всей системы); 3. Имитационные модели сложных систем (позволяющие прогнозировать поведение систем). Отмечается, что последние представляют наибольшее практическое значение (*Абакумов, 2006*). Согласно другой классификации (*Кахраманова, 2012*) отмечаются статистические (например, универсальная модель для оценки потери почв USLE, а также WEPP и др.) и динамические модели экосистем.

Кроме того, существует несколько экологических моделей, направленных на изучение влияния антропогенных воздействий на качество окружающей среды, а также здоровье человека,



(*Rosenbaum et al., 2008*). Например, *модель CalTOX*, которая, на основе изучения особенностей концентрирования химических веществ в почве, воде, воздухе, донных отложениях или растениях, позволяет изучать неблагоприятные последствия для здоровья человека, живущего или работающего вблизи территорий, характеризующихся высоким уровнем загрязнения (*CalTOX, 2017*).

Отдельного внимания заслуживает *модель USEtox*, созданная *Обществом экологической токсикологии и химии (SETAC)*. Стоит отметить, что коллектив авторов модели состоит из ученых–исследователей, принимавших участие в разработке и создании нескольких экологических моделей, таким образом, в модели USEtox учтены все достоинства и недостатки уже существующих моделей. Идея ее создания возникла еще в начале 2000–х гг., однако первая версия модели (USEtox version 1.0) стала официально доступна только в 2010 г. (*Westh et al., 2015*). Модель USEtox – это экологическая модель, направленная на определение токсического воздействия химических веществ на качество экосистем и здоровье человека, и объединяющая в себе принципы сразу двух методов: анализа жизненного цикла и оценки рисков (*USEtox, 2017*).

База данных модели USEtox включает информацию по токсическому воздействию более 3000 органических соединений и 25 неорганических элементов-металлов, при этом учитывается их канцерогенное и не канцерогенное воздействие при ингаляционном и пероральном способах поступления. Применение данной модели возможно для оценки загрязненности воздуха хозяйственных и промышленных помещений, городских и сельскохозяйственных территорий; для морской и пресной воды; для природных и сельскохозяйственных почв. Ее можно также использовать при изучении некоторых продуктов питания: зерновых культур (рис и пшеница), картофеля, томатов, салата и яблок.

Одним из преимуществ модели является учет многофакторности воздействия химических веществ/элементов: принимается во внимание их поступление с воздухом и пищей. Другим серьезным достоинством, представляющим уникальность модели и актуальность ее использования в контексте экологических исследований, является учет специфических климато–географических особенностей территории. Вся территория земного шара разделена на 8 континентальных и 17 субконтинентальных зон, каждая из которых характеризуется различными климатическими, гидрологическими, географо–экономическими и другими параметрами. Стоит заметить, что на сегодняшний день эта единственная известная нам модель, позволяющая учитывать географическую дифференциацию.

В настоящее время данная модель практически не известна в России и пока не нашла широкого применения в экологических исследованиях. Пожалуй, единственным примером ее использования в РФ является работа *А.Р. Ялалтдиновой (2015)*, выполненная в рамках двойной

аспирантуры. Однако, модель широко применяется в работах иностранных исследователей (*Querini et al., 2011; Suciú et al., 2012; Marchand et al., 2013; Igos et al., 2014; Morales-Mora et al., 2014*). И что особенно важно, она признана и рекомендуется мировым научным сообществом: Программа ООН по окружающей среде (UNEP), Общество экологической токсикологии и химии (SETAC), Европейская комиссия, Институт окружающей среды и устойчивого развития, Агентство по охране окружающей среды США (EPA) и др., как наилучшая научная модель для оценки токсического воздействия химических веществ на экосистемы и здоровье человека (*Rosenbaum et al., 2008, 2011; Henderson et al., 2011; Westh et al., 2015*).

*Таким образом, представленный обзор демонстрирует, что в настоящее время существует большое количество различных методов, подходов, концепций и моделей оценки состояния окружающей среды, многие из которых ориентированы также на определение и прогнозирование возможных негативных последствий на живые организмы, в том числе здоровье человека. Безусловно, в данном обзоре не охвачены все существующие способы оценки окружающей среды, но показаны наиболее часто встречающиеся в современных экологических исследованиях. Не существует одного уникального способа оценки, каждый из них характеризуется специфичными особенностями, и выбор того иного способа зависит, прежде всего, от целей и задач исследования. Как можно заключить из представленного обзора, одной из специфичных особенностей современных методов экологической оценки является создание новых методов на стыках смежных областей наук. На наш взгляд, совместное использование нескольких методов, подходов, концепций или моделей может дать комплексную и более исчерпывающую оценку воздействия на окружающую среду.*

## ГЛАВА 4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1 Исходный материал, методика пробоотбора и пробоподготовки

Для изучения особенностей накопления и распределения брома в окружающей среде нами проводилось комплексное исследование, включающее опробование многочисленных объектов природной среды. Пробоотбор осуществлялся, главным образом, на территории Томской области. Для проведения сравнительного анализа отбор проб также производился в других регионах Российской Федерации и зарубежья. При выполнении работ соблюдались общие методологические принципы проведения эколого–геохимических исследований (*Эколого–геохимические ...*, 2006). Основные объекты исследования, отобранные и/или подготовленные при личном участии автора в период с 2011 по 2014 гг., представлены в таблице 4.1. Дополнительный материал, использовавшийся в работе и обобщенный автором, указан в таблице 4.2.

**Таблица 4.1 – Основные объекты и методы исследования**

Объект исследования	Кол-во проб	Место отбора	Вид анализа
Почва	20	Томская область	ИНАА, РФА, ICP-MS
	6	Франция, регион Гранд Эст	ICP-MS
Питьевая вода	5	Томская область	
	3	Франция, регион Гранд Эст	
Солевые отложения (накипь) питьевых вод	38	Томская область	ИНАА
Волосы детей	72		ИНАА, ICP-MS
Кровь	30		ИНАА
Микроорганизмы минеральных источников	3		
	18	Байкальский регион	
Листья тополя ( <i>Populus nigra</i> )	10	Томская область	ИНАА
	3	Франция	
Лабазник вязолистный ( <i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.)	11	Томская область	
Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> )	5		
Клюква ( <i>Vaccinium oxycoccos</i> L. (1753))	3		
Черника обыкновенная ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )	5		
Продукты питания	34		

Общее количество отобранных и/или подготовленных автором проб составляет 266 образцов.

Таблица 4.2 – Объекты исследования, обобщенные автором

Объект исследования	Общее кол–во проб	Места отбора	Вид анализа	Организации и специалисты, предоставившие материал
Почва	382	Томская область, Челябинская область, Р. Бурятия	ИНАА	ГЭГХ ТПУ, Жорняк (2009)
Уголь	19	Томская область		д–р. геол.–мин. наук, проф. ГЭГХ ТПУ Арбузов С.И.
Донные отложения	36			старш. преподаватель ГЭГХ ТПУ Иванов А.Ю.
Солевые отложения (накипь) питьевых вод	279	Томская область, Самарская область, Тюменская область, Франция, Челябинская область, Павлодар, Крым		ГЭГХ ТПУ
Волосы детей	767	Томская область, Челябинская область, Р. Хакасия, Р. Тыва, Р. Алтай, Р. Белоруссия, Вьетнам, Р. Казахстан, Иркутская область	ИНАА, ICP–MS	ГЭГХ ТПУ
Кровь человека	325	Томская область, Челябинская область, Иркутская область, Р. Казахстан	ИНАА	ГЭГХ ТПУ; СибГМУ; Ильинских Н.Н., Ильинских Е.Н., Матковская Т.В., районные больницы Томского и Зырянского рай– ов; Сухих Ю.И., Попов В.Я., сотр. медучреждений нас. пунктов Томской области
Щитовидная железа (патологически измененные ткани)	117	Томская область		канд. мед. наук Денисова О.А., СибГМУ
Биопсийный материал органов и тканей человека ( <i>Homo sapiens Linnaeus 1758 (Primates, Mammalia)</i> )	77			Федоров С.Ю., морг Томского района Томской области, канд. мед. наук Станкевич С.С.
	13	Краснодарский край		д–р. геол.–мин. наук, проф. Алексенко В.А., ЮСФУ
Моча детей	64			канд. мед. наук Станкевич С.С. (2010), СибГМУ
Молоко женщин				
Органы и ткани свиньи домашней ( <i>Sus scrofa domestica Linnaeus 1758 (Artiodactyla, Mammalia)</i> )	78	Томская область		ИНАА, СЭМ
Лягушка остромордая ( <i>Rana arvalis</i> )	16		ИНАА	канд. биол. наук Куранова В.Н., ТГУ
Скорлупа яиц дроздов ( <i>Turdus pilaris</i> )	5			д–р биол. наук Куранов Б.Д., ТГУ

продолжение таблицы 4.2

Речная рыба ( <i>Perca fluviatilis</i> , <i>Esox lucius</i> )	10	Томская область	ИНАА	ГЭГХ ТПУ
	2	Вьетнам		
Ряска ( <i>Lemna minor</i> L.)	8	Томская область		ГЭГХ ТПУ, канд биол.наук Шайморданова Б.Х., Асылбекова Г.Е., ПГПИ
Листья тополя ( <i>Populus nigra</i> )	79	Томская область, Забайкальский край, Р.Казахстан		
Лабазник вязолистный ( <i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.)	64	Томская область, Новосибирская область, Красноярский край, Р. Алтай Р. Хакасия		ГЭГХ ТПУ
Княжик сибирский ( <i>Atragene speciosa</i> Weinm.)	11	Томская область, Р.Хакасия, Р.Алтай, Р. Тыва, Красноярский край		д-р. фарм. наук Шилова И.В., исследоват. инст–т фармакологии СО РАН г. Томска
Бадан ( <i>Bergenia crassifolia</i> )	1	Томская область		ГЭГХ ТПУ
Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> )	5	Томская область		
Клюква ( <i>Vaccinium oxycoccos</i> L. (1753))	7			
Черника обыкновенная ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )	40	Томская область, Р. Алтай, Кемеровская область		
Картофель ( <i>Solanum tuberosum</i> )	27	Томская область		

**Почва.** Отбор проб почв проводился с учетом ГОСТов (*Инструкция ...*, 1983; *Методические ...*, 1982; *ГОСТ 17.4.3.01-83*; *ГОСТ 17.4.1.02-83*; *ГОСТ 17.4.4.02-84*), а также методических разработок коллектива ИМГРЭ (*Комплексная ...*, 1997). Изученность почв Томской области представлена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Изученность почв на территории населенных пунктов Томской области

Район	Населенный пункт	Количество проб
Парабельский	Высокий Яр, Новосельцево, Чигара	6
Колпашевский	Белояровка, Инкино, Маракса, Типсино, Юдино	6
Чаинский	Коломенские Гривы, Варгатер, Усть-Бакчар, Подгорное, Бундюр	16
Молчановский	Молчаново, Нарга, Тунгусово	5
Кривошеинский	Володино, Кривошеино	2
Шегарский	Мельниково	2
Кожевниковский	Кожевниково, Уртам, Новопокровка	33
Томский	Халдеево, Наумовка, Новоархангельск, районы: Октябрьский, Ленинский, Советский, Кировский	182
Асиновский	Ягодное, Новониколаевка, Филимоновка, Большедорохово	15
Первомайский	Комсомольск	5
Верхнекетский	Катайга, Санджик, Ягодное, Степановка, Сайга, Белый Яр, Тайное, Клюквинка	14
Тегульдетский	Тегульдет, Четь, Покровский Яр, Белый Яр, Берегаево, Черный Яр, Байгалы	20
Зырянский	Берлинка, Иловка, Чердаты, Зырянка, Цыганово, Семеновка	44
Бакчарский	Кенга, Поротниково, Высокий Яр, Новая Бурка, Подольск, Плотниково, Чумакаевка, Польшнянка, Хуторское, Бакчар, Чернышевка, Крыловка, Кедровка, Вавиловка, Парбиг, Большая Галка, Богатыревка, Панычево	39

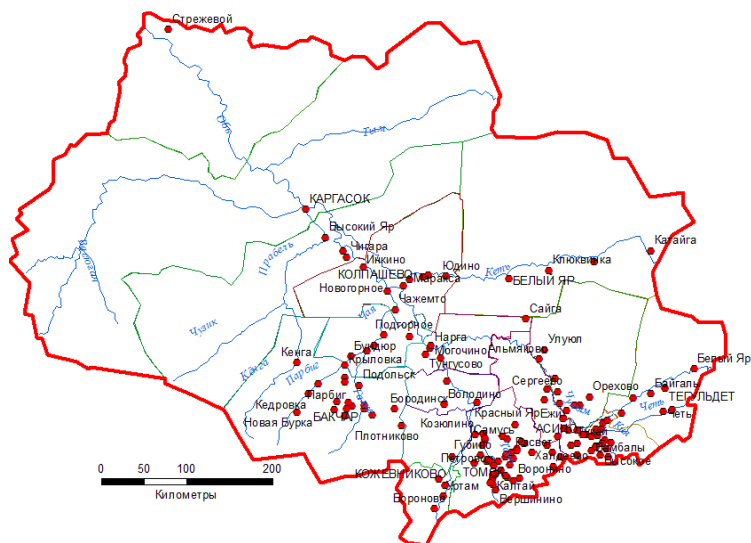
Отбор почвенных образцов проводился в последней декаде апреля – первой декаде мая методом «конверта» из пяти точек, глубина которых составляла около 10 см – верхний плодородный слой. Опробованию подвергались, в основном, почвы приусадебных хозяйств населенных пунктов, за некоторым исключением. Например, в пределах Томского района области пробы почв отбирались, преимущественно, в зонах расположения разнопрофильных промышленных предприятий, несколько проб были также отобраны в приусадебных хозяйствах населенных пунктов. При отборе проб фиксировалось наличие/отсутствие использования органических удобрений. Точечные пробы, отобранные на одной пробной площадке, объединялись, чем достигалось их смешение. Пробоподготовка включала: предварительное подсушивание почвы, удаление посторонних включений, и по следующей схеме, представленной на рисунке 4.1.



**Рисунок 4.1** – Схема обработки и изучения проб почвы (Языков, Шатилов, 2003)

**Питьевая вода и накипь питьевых вод.** Отбор проб питьевых вод был осуществлен в пяти населённых пунктах Томской области (Самусь, Наумовка, Копылово, Кузовлево, Зональный) и во Франции из кранов водопроводных сетей домов. Отбор образцов проводился в соответствии с требованиями (ГОСТ Р 51592-2000).

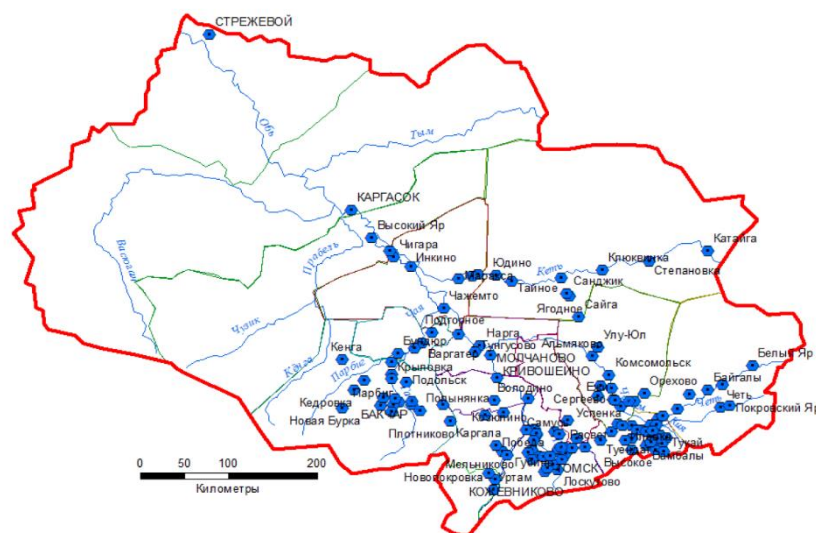
Отбор проб накипи питьевых вод проводился согласно методике, изложенной в патенте №2298212 «Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды» из различных типов посуды (эмалированные и электрические чайники, кастрюли, котлы, самовары), в которой многократно кипятилась вода, используемая для питьевого водоснабжения. При этом фиксировалась следующая информация: тип посуды, используемой для кипячения воды, а также, по возможности, глубина залегания водоносного горизонта. Как было выявлено при одновременном отборе проб накипи из посуды разного типа, тип нагревательного прибора не влияет ни на химический, ни на минеральный состав солевых отложений (Монголина, 2011; Соктоев, 2015). Схема отбора проб на территории Томской области представлена на рисунке 4.2.



*Рисунок 4.2 – Схема отбора проб накопи питьевых вод на территории Томской области (Монголина, 2011)*

**Волосы.** Пробоотбор волос осуществлялся согласно стандартной методике, рекомендованной МАГАТЭ (1980) у детей обоих полов в возрасте 3–15 лет, постоянно проживающих на исследуемой территории и не имеющих отклонений по медицинским показателям. Волосы срезались ножницами из нержавеющей стали близко к корню с пяти точек головы. Общая масса пробы составляла 200–500 мг. В ходе осуществления пробоподготовки образцы волос дважды попеременно выдерживались в ацетоне и промывались дистиллированной водой, затем высушивались при комнатной температуре. Перед отправлением на анализ, пробы развешивались по 100 мг и упаковывались в пакеты из фольги. Схема отбора проб в Томской области представлена на рисунке 4.3.

*Рисунок 4.3 – Схема отбора проб волос детей на территории Томской области (Наркович, 2012)*



**Кровь.** Отбор проб крови человека осуществлялся из вены в шприц объемом 5 мл сотрудниками Сибирского государственного медицинского университета (проф. Н.Н. Ильинских, проф. Т.В.Матковская), а также фельдшерами и медсестрами сельских медицинских пунктов Томской области. Забор крови проводился в соответствии со всеми требованиями и



правилами, предусматривающими использование стерильных перчаток, игл, шприцов, т.д. у детского и взрослого населения, с фиксированием анкетных данных. Затем кровь высушивалась в муфельной печи при температуре 50–60°C с использованием чашек Петри до твердого состояния, измельчалась в агатовой ступке до порошкообразного состояния и упаковывалась в фольгу по 100 мг для проведения анализа. Места отбора проб в Томской области представлен в таблице 4.4.

**Таблица 4.4** – Места отбора проб крови на территории Томской области

Район	Населенный пункт	Количество проб
Александровский	Стрежевой	5
Каргасокский	Каргасок	4
Чаинский	Подгорное	1
Шегарский	Мельниково, Монастырка, Победа, Ново -Ильинка	6
Кожевниковский	Зайцево, Кожевниково	3
Томский	Лоскутово, Корнилово, Самусь, Кисловка, Кандинка, Томск, Наумовка, Черная речка, Северск	133
Первомайский	Туендат, Орехово	3
Верхнекетский	Сайга	3
Зырянский	Зырянка, Цыганово, Семеновка, Берлинка, Чердаты, Иловка	62
Бакчарский	Поротниково, Полынянка, Чумакаевка, Вавиловка, Хуторское, Богатыревка, Чернышевка, Новая Бурка, Большая Галка, Высокий Яр, Кедровка, Бакчар	35

**Растительность.** *Листья тополя* (*Populus nigra*) отбирались только со средневозрастных деревьев (по 20–30 листьев с дерева), из нижней части кроны на уровне поднятой руки, с максимального количества доступных веток (стараясь задействовать ветки разных направлений). Пробоподготовка включала: удаление пыли, промыванием листьев небольшим количеством дистиллированной воды; высушивание при комнатной температуре; озоление в муфельной печи при температуре 450–500°C, последующее истирание в агатовой ступке до пудры, упаковывание золы в алюминиевую фольгу (100 мг) для анализа.

Отбор проб *лабазника вязолистного* (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim), *брусники* (*Vaccinium vitis-idaea*), *клюквы* (*Vaccinium oxycoccos* L. (1753), *черники обыкновенной* (*Vaccinium myrtillus*), проводился в период цветения – начала плодоношения, *микроорганизмов минеральных источников* – в летний период. Пробоподготовка лабазника и микроорганизмов

проводилась аналогичным образом: материал, высушенный при комнатной температуре, измельчался и просеивался через сито диаметром 1–3 мм; остальные виды растительности озолялись в муфельной печи при температуре 450–500°C. Готовые пробы упаковывались в алюминиевую фольгу для последующего анализа.

**Продукты питания.** Анализируемые продукты питания: сахар, гречка, рис, чай, макароны, хлеб, молоко, кофе, фрукты (яблоки, апельсин, банан), овощи (лук, морковь, свекла, огурцы), помидоры, курица были куплены автором в ноябре 2015 года на оптовом рынке г. Томска. Стоит отметить, что данные продукты питания с данного рынка поставляются и в другие населенные пункты районов области. Твердые продукты, не нуждающиеся в предварительном просушивании (сахар, гречка и др.), измельчались в агатовой ступке до порошкообразного состояния и упаковывались в фольгу. Остальные продукты высушивались в муфельной печи при температуре 50–60°C, затем измельчались и также упаковывались в фольгу. Яблоки, апельсин и банан, как фрукты, были объединены, огурцы и томаты также анализировались совместно. Для каждого продукта питания проводилось по три измерения, результаты в работе представлены в виде среднего значения.

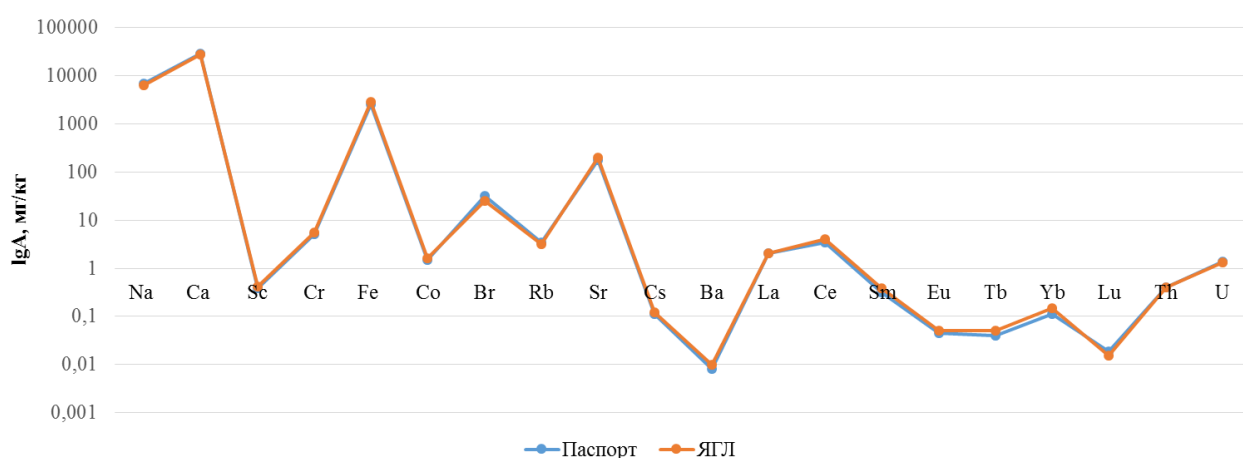
#### ***4.2 Аналитические методы лабораторных исследований***

Для количественного определения брома в компонентах окружающей среды использовались следующие методы: инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), а также сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Все отобранные материалы анализировались в аккредитованных лабораториях по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов сравнения. Достоверность анализов подтверждалась контрольными определениями на разных средах, выполнялся внутренний контроль.

##### ***4.2.1 Инструментальный нейтронно-активационный анализ***

ИНАА – современный ядерно-физический метод анализа, отличающийся высокой чувствительностью и позволяющий определять содержание 28 химических элементов без учета химической формы образца. Он основан на анализе радиоактивных изотопов, образующихся в образце под воздействием облучения тепловыми нейтронами и широко используется для аттестации как отечественных, так и зарубежных (МАГАТЭ и др.) стандартных образцов. Основным его преимуществом является количественное определение значительного спектра химических элементов из одной (даже малой – 100 – 400 мг) навески без разрушения образца (*Эколого-геохимические ...*, 2006).

Анализ образцов проводился на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т в ядерно–геохимической лаборатории (ЯГЛ) кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.518623 от 10.10.2011 г.; аналитики – с. н. с. А.Ф. Судыко и Л.Ф. Богутская) согласно инструкции НСАМ ВИМС № 410-ЯФ. Плотность потока тепловых нейтронов в канале облучения составляла  $2 \cdot 10^{13}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ , продолжительность облучения проб – 20 часов. Измерения проводились на гамма-спектрометре с германий-литиевым детектором ДГДК-63А. Исследования проводились с использованием стандартного образца сравнения – стандарт ЭК–1 «Элодея канадская» (рисунок 4.4)<sup>(4)</sup>.



**Рисунок 4.4** – Сопоставление результатов ИНАА

Нижний предел обнаружения брома в природных средах (почва, растительность, твердый осадок снега и др.) методом ИНАА составляет 0,3 мг/кг (*Эколого–геохимические...*, 2006).

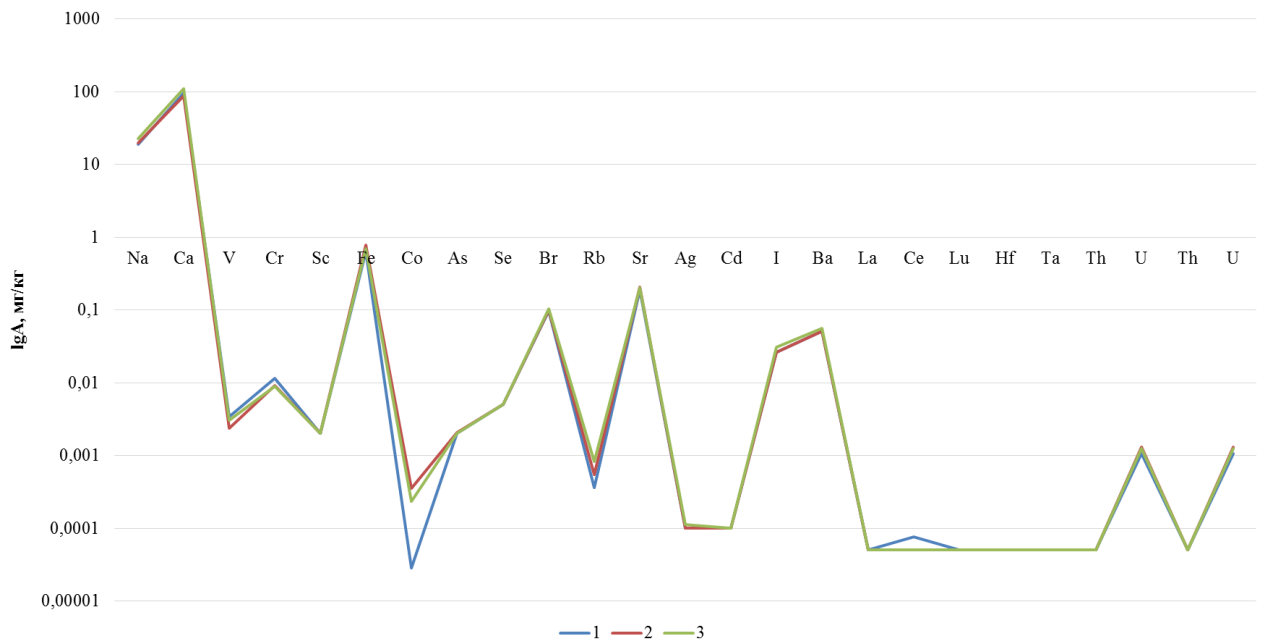
#### 4.2.2 Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой

ICP–MS – современный метод определения элементов в малых (мкг/кг) и сверхмалых (нг/кг и менее) концентрациях. Он основан на использовании индуктивно-связанной плазмы в качестве источника ионов и масс-спектрометра для их разделения и детектирования и позволяет определять практически все химические элементы в одной навеске за минимальный промежуток времени (около 1 мин.).

Анализ образцов проводился в аналитическом центре ООО «Химико-аналитический центр «Плазма» (г. Томск, аттестат аккредитации № РОСС.RU.0001.516895 от 25.03.2014 г., директор – Н.В. Федюнина). Результаты внутреннего контроля (каждая отобранная проба была

<sup>(4)</sup> Паспорт – стандарт ЭК–1 «Элодея канадская»; ЯГЛ – ядерно-геохимическая лаборатория кафедры ГЭГХ ТПУ

проанализирована 3 раза) позволяют говорить об удовлетворительной сходимости по большинству определяемых химических элементов, в том числе по брому (рисунок 4.5).



**Рисунок 4.5 – Внутренний контроль ICP–MS**

#### **4.2.3 Рентгенофлуоресцентный анализ**

РФА – современный аналитический метод, позволяющий проводить многоэлементный анализ и отличающийся высокой спектральной селективностью к определяемым элементам. Метод характеризуется высокой экспрессностью и относительно простой пробоподготовкой. Анализ 20 образцов почв проводился в испытательной лаборатории Института почвоведения и агрохимии СО РАН г. Новосибирск (Аттестат аккредитации №РА.RU.21АИ55 от 18 июля 2016 г., руководитель лаборатории – А.И. Сысо).

#### **4.2.4 Сканирующая электронная микроскопия**

Электронно-микроскопические исследования проводились на базе учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики МИНОЦ «Урановая геология» на кафедре ГЭГХ ТПУ, аналитик – С.С. Ильенок. Главными преимуществами метода СЭМ являются высокая разрешающая способность, за счёт которой можно увидеть минеральные частицы размером до десятков нанометров, и проведение количественного рентгеноспектрального анализа с помощью энергодисперсионного спектрометра (ЭДС). Изучался вещественный состав золы (в первую очередь, наличие/отсутствие хлора) трубчатой кости свиньи домашней. Исследование проводилось на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N

(разрешение в 10 нм при ускоряющем напряжении 3 кВ) с ЭДС Bruker XFlash 4010 для проведения рентгеноспектрального анализа.

#### **4.3 Методика обработки данных**

Обработка и обобщение полученного аналитического материала проводились на персональном компьютере с помощью офисного пакета Microsoft Office (Excel, Word 2013) и программы «Statistica 7». Для построения графического материала использовалось программное обеспечение «Surfer 10» и «Inkscape 0.91». Для создания карт распределения брома в природных средах в «Surfer 10» применялся метод Kriging. Выборки создавались по Томской области, отдельным ее административным районам, населенным пунктам, а также по степени удаленности от предполагаемых источников загрязнения.

Статистическая обработка данных (при уровне надежности 95%) включала: среднее содержание, стандартную ошибку, медиану, моду, минимальные и максимальные содержания, стандартное отклонение, дисперсию выборки, коэффициент вариации. При расчете средних содержаний элементов из общей выборки убирались «ураганные пробы», но в разбросах частных значений они показаны. При содержании некоторых элементов в концентрациях ниже предела обнаружения анализа при расчете использовалось половина порогового значения (*Михальчук, 2006*). Проверка нормального закона распределения элементов в выборке проводилась тестами Колмогорова-Смирнова и Хи-квадрат.

Вне зависимости от характера распределения брома, в качестве средних уровней содержания нами принимались среднеарифметические значения по выборке, которые, как при нормальном, так и асимметричном распределении дают наиболее состоятельную оценку значений концентраций (*Ткачев, Юдович, 1975*).

Для характеристики корреляций между содержаниями брома с другими химическими элементами рассчитывались парные коэффициенты корреляции по критерию Пирсона для нормального распределения и Спирмена при отличии распределения от такового. При этом оценка значимости корреляции рассчитывалась с помощью счетчика вероятности на уровне значимости  $p=0,05$  для заданного объема выборки (*Михальчук, 2006*). Кроме того, по результатам кластерного анализа были построены дендрограммы корреляционной матрицы (тип анализа иерархический, метод расчета расстояний – коэффициент корреляции Пирсона). Для сравнения значимости различий между двумя выборками использовались критерий Стьюдента или U-критерий Манна-Уитни, различия принимались значимыми при  $p$ -уровне от 0,001 до 0,01.

При анализе рассчитывались следующие показатели:

1. *Коэффициент концентрации*, который является показателем уровня аномальности содержаний элементов и рассчитывается, как отношение содержания элемента в природной среде (С) к его кларку или фоновому значению (Сф)

$$K_k = C/C_f \quad (4.1)$$

В качестве значений кларка использовался показатель для ноосферы (Глазовский, 1982). В качестве фона использовались уровни накопления элементов в конкретных объектах, отобранных на удаленных от урбанизированных районов территориях или средние значения по области по выборке. По рассчитанным значениям коэффициента концентрации (при  $K_k > 1$ ) составлялись геохимические ряды в порядке убывания значений.

2. *Суммарный показатель загрязнения* (по Саету и др., 1990), характеризующий загрязнение несколькими загрязняющими веществами, рассчитывался исключительно для почв по формуле 4.2. В качестве фоновых значений для почв использовались данные по заказнику «Томский» (Язиков, 2010).

$$Z_{СПЗ} = \sum K_k - (n-1) \quad (4.2),$$

где:

$K_k$  – коэффициент концентрации,

$n$  – количество изучаемых элементов

По величине суммарного показателя загрязнения почвенного покрова существует ориентировочная шкала оценки аэрогенных очагов загрязнения (Саеt и др., 1990), согласно которой выделяются следующие интервалы и соответствующие им уровни загрязнения:

- менее 16 – низкий,
- 16 – 32 – средний (умеренно опасный),
- 32 – 128 – высокий (опасный),
- Более 128 – очень высокий (чрезвычайно опасный).

Интерпретация и обобщение полученных результатов проводились с использованием опубликованной и фондовой информации по рассматриваемой тематике.

#### **4.4 Методика оценки токсичности брома с помощью модели USEtox**

В наиболее полной мере общие математические основы модели USEtox, которая разработана в Microsoft Excel, представлены в сопутствующих ей официальных документах, доступных на сайте (USEtox, 2017). Нами рассмотрены основные принципы, используемые для

расчетов общего показателя токсического воздействия. Все используемые формулы показаны на английском языке согласно представлению в модели, а их расшифровка максимально адаптирована на русский язык.

1. *Общий показатель токсического воздействия на экосистемы и здоровье человека*

$$IS = \sum CF_{x,i} * M_{x,i} \quad (4.3),$$

где:

IS – общий показатель токсического воздействия на экосистемы и здоровье человека,

CF – характеристический коэффициент токсичности химического элемента или соединения  $x$ , в компоненте природной среды  $i$ ,

M – масса химического элемента или соединения  $x$ , в компоненте природной среды  $i$ .

Единицей измерения общего показателя токсического воздействия на экосистемы является  $STU_{eco}$  – относительная единица токсичности для экосистем; общего показателя токсического воздействия на здоровье человека – в  $STU_{hum}$  – относительная единица токсичности для здоровья человека; характеристический коэффициент токсичности для экосистем измеряется в потенциально исчезнувшей части особей\* $m^3$ \*день/кг химического вещества/соединения, для здоровья человека – в дали/кг химического элемента/соединения; масса – в кг.

*Примечание: к аналогам потенциально исчезнувшей части особей можно отнести следующий показатель, применяемый в России: изменение численности сапрофитных бактерий, почвенных грибов, актиномицетов и т.д. – СП 2.1.7.1386-03; DALY или ДАЛИ – общее количество лет, потерянное из-за преждевременной смертности и количество лет, прожитых с инвалидностью, также определяется как количество потерянных лет здоровой жизни (Социально–экономические..., 2006).*

2. *Характеристический коэффициент токсичности*, в свою очередь, основан на трех факторах:

$$CF = FF \times XF \times EF \quad (4.4),$$

где:

**FF** – *fate factor*, или **фактор «судьбы»**, определяющий поведение химического элемента/соединения (например, деградация, рассеивание) в окружающей среде и основанный, преимущественно, на его физико–химических свойствах. Он является одинаковым при расчете токсичности для экосистем и здоровья человека, измеряется в  $кг_{вг}$  в  $окруж.среде/кг_{вг}$  выделенного в  $окруж.среду/день$ .

**XF** – *exposure factor*, или **фактор экспозиции** оценивает контакт между человеком/экосистемами (рецепторы) и окружающей средой на основе доли химического

элемента/вещества, которое получает рецептор за определенный промежуток времени (например, день). При расчете токсичности для человека данный фактор учитывает поступление элемента через воздух, воду, почву и некоторые продукты питания (измеряется в  $\text{кг}_{\text{потребленного Вг}}$  в день/ $\text{кгВг}$  в окруж.среде). Что касается экосистем, данный фактор применим только к пресноводным организмам и измеряется в доле брома, растворимого в воде.

Первые два фактора рассчитываются в модели путем решения уравнений баланса массы. Характеристический коэффициент токсичности для человека предполагает их объединение в долю потребления (intake fraction –  $iF$ ):

$$iF = FF \times XF \quad (4.5)$$

***EF*** – *effect factor, или фактор эффекта/результата* отражает воздействие на здоровье человека и состояние экосистем, обусловленное поступлением химического элемента/вещества в живой организм разными способами (через воздух, воду, почву или продукты питания).

Для человека он рассчитывается на основе данных ЭД<sub>50</sub> (см. список определений), полученных в опытах на экспериментальных животных и экстраполированных на человека отдельно для перорального и ингаляционного способов поступления химического элемента/вещества (формула 4.6 и 4.7 соответственно) и измеряется в случае заболевания/ $\text{кг}_{\text{потребленного Вг}}$ .

$$ED50_{ing} = \frac{ED50_{a,t} \times BW \times LT \times N}{AF_a \times AF_t \times 10^6} \quad (4.6)$$

$$ED50_{inh} = \frac{ED50_{a,t} \times INH \times LT \times N}{AF_a \times AF_t \times 10^6} \quad (4.7),$$

где

$ing$  – пероральный способ поступления,

$inh$  – ингаляционный способ поступления,

$ED50_{a,t}$  – значение ЭД<sub>50</sub><sup>(5)</sup>, установленное в ходе эксперимента над животным а за время эксперимента  $t$  (мг/кг в день),

$BW$  – средняя масса человека (70 кг),

$INH$  – среднее количество вдыхаемого воздуха ( $13\text{м}^3$  в день),

$LT$  – средняя продолжительность жизни (70 лет),

$N$  – количество дней в году (365),

---

<sup>(5)</sup> Может быть рассчитан из ЛД<sub>50</sub>, NOAEL, LOAEL, TD50 и др.



$AF_a$  – экстраполяционный фактор межвидовых различий<sup>(6)</sup>,

$AF_t$  – экстраполяционный фактор времени экспозиции<sup>(7)</sup>.

Фактор токсикологического эффекта для экосистем рассчитывается на основе  $HC_{50}$ , который, в свою очередь, основан на полумаксимальной эффективной концентрации ( $EC_{50}$ ) и должен включать максимально возможное количество трофических уровней (формула 4.8) и измеряется в потенциально исчезнувшей части особей\* $m^3$ \*день/кг<sub>Br</sub>.

$$\log HC_{50} = \frac{1}{n_s} * \sum_s \log EC_{50_s} \quad (4.8),$$

где

$n_s$  – количество видов,

$EC_{50}$  – полумаксимальная эффективная концентрация.

3. Для перехода от концентрации брома в почвах к его массе, нами была применена формула, не предусмотренная в модели и специально разработанная одним из авторов USEtox (P. Fantke) в рамках данного исследования:

$$M_{Br} = \frac{C_{x,i} \times V_s \times \rho_s}{10^6} \quad (4.9),$$

где:

$M$  – масса брома в почвах (в кг),

$C$  – концентрация брома в почвах по результатам аналитических методов (в мг/кг),

$V$  – общий объем почвы (в  $m^3$ ), рассчитывается в модели на основе данных по территории исследования (Томская область),

$\rho$  – объемная плотность почв (в  $kg/m^3$ ), рассчитывается в модели на основе данных по территории исследования (Томская область).

*Таким образом, работа основана на материале, отбор и пробоподготовка которого были осуществлены согласно нормативным документам и отработанным методикам. Современные высокочувствительные аналитические методы исследования наряду с использованием современного программного обеспечения и традиционных методов статистической обработки данных, позволяют считать полученные результаты достоверными с высокой степенью точности.*

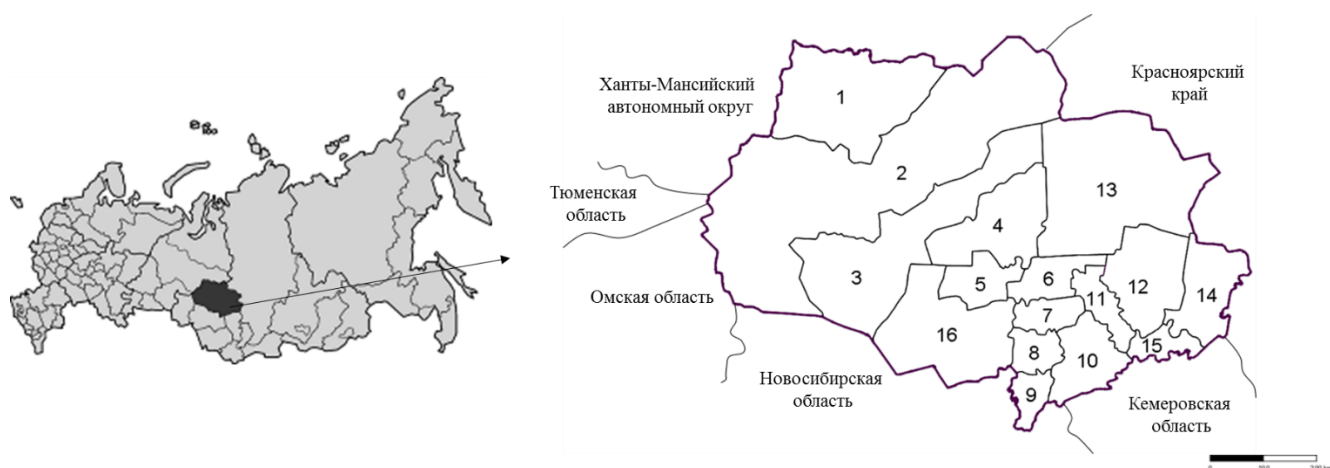
<sup>(6)</sup> Установлен для мышей, крыс, морских свинок, кроликов, кошек, собак, обезьян, свиней и некоторых других видов.

<sup>(7)</sup> Установлен для подострой, средней длительности и хронической экспозиций.

## ГЛАВА 5. КРАТКАЯ ПРИРОДНО–КЛИМАТИЧЕСКАЯ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Томская область – регион Российской Федерации общей площадью 316,9 тыс. км<sup>2</sup>, расположенный в юго–восточной части Западной равнины по обеим сторонам р.Обь. На севере область граничит с Ханты–Мансийским автономный округом, на западе – с Тюменской и Омской областями, на юге – с Новосибирской и Кемеровской областями, а на востоке – с Красноярским краем (Евсеева, 2001). В состав области входят 16 муниципальных районов (рисунок 5.1), административным центром является г. Томск. Более 80% территории Томской области относится к районам крайнего Севера.

Географическое положение Томской области и природные особенности ее территории, в том числе многочисленное разнообразие природных ресурсов, могут, в значительной степени, оказывать влияние на миграцию брома в ландшафтах, а также способствовать аккумулярованию элемента в окружающей среде.



**Рисунок 5.1** – Географическое положение Томской области и ее административно–территориальное устройство

*Примечание: районы: 1 – Александровский, 2 – Каргасокский, 3 – Парабельский, 4 – Колпашевский, 5 – Чаинский, 6 – Молчановский, 7 – Кривошеинский, 8 – Шегарский, 9 – Кожевниковский, 10 – Томский, 11 – Асиновский, 12 – Первомайский, 13 – Верхнекетский, 14 – Тегульдетский, 15 – Зырянский, 16 – Бакчарский.*

Климат Томской области является переходным: от умеренно– к резко–континентальному. Он характеризуется коротким и тёплым летом, продолжительной и холодной зимой, и поздними весенними и ранними осенними заморозками. Равнинная поверхность и открытость территории области с севера и юга благоприятствуют свободному проникновению воздушных масс с Арктики и Средней Азии, что является одной из причин неустойчивости погоды. Среднегодовая температура воздуха отрицательная и изменяется от  $-0,6^{\circ}\text{C}$  на юге до  $-3,5^{\circ}\text{C}$  на северо-востоке.

Годовое количество осадков варьирует в среднем от 400 до 570 мм, при этом наибольшее их выпадение фиксируется на западе, а также на востоке и северо-востоке при приближении к Среднесибирскому плоскогорью (*Евсеева, 2001*).

Более 97% территории Томской области относится к Западно-Сибирской равнине. На территории области выделяются Кетско-Тымская, Чулымская, Приаргинская, Восточно-Барабинская и Васюганская наклонные равнины. В центральной части области с юго-востока на северо-запад протягивается Обь–Тымская низменность, в ее пределах расположена долина р. Оби (*Евсеева, 2001*).

Рельеф Томской области, являющийся плоским и сильно заболоченным, благоприятствует аккумуляции брома, именно ввиду наличия значительного количества болот на территории области (средняя заболоченность 39,5–50% (*Дюкарев, 1991*), которые являются своеобразными бромными биогеохимическими провинциями (*Селиванов, 1939*). В целом же, в рельефе области можно выделить ряд гипсометрических уровней. Река Обь делит область на относительно возвышенную (до 193 м) правобережную часть и пониженную левобережную. Наиболее возвышенным является Томь-Яйское междуречье, куда заходят отроги Кузнецкого Алатау. Здесь расположена высшая точка Томской области – 264 м. Отсюда поверхность понижается в северо-западном направлении. Минимальная высота равна 30 м и приурочена к урезу воды р.Обь на северной границе области (*Евсеева, 2001*).

Почвообразующие породы, которые согласно *А.Г. Конарбаевой (2004, 2008)* на современном этапе не играют серьезной роли в накоплении брома, но способные служить источниками элемента в процессе их формирования, имеют в пределах Томской области аллювиальный, озерно-аллювиальный, озерный, а также водно-ледниковый, а местами и эоловый генезис. При этом, почвообразовательный процесс на территории области характеризуется рядом отличительных черт: тесной зависимостью от свойств материнского субстрата; слоистостью отложений; повышенной обводненностью в северной и центральной части области; сильным влиянием мезо- и микрорельефа на почвообразование; обедненностью карбонатами почвообразующих пород в пределах средней тайги и обогащенностью — в южной; суровостью климата; длительным промерзанием и медленным оттаиванием почв, способствующих их переувлажнению; а также тесной связью распределения растительных сообществ с литологией пород и почвенным климатом. Все эти факторы находятся в различном соотношении в зависимости от местоположения участка, из них складываются условия определенных типов почвообразования: дернового, подзолообразовательного и болотного. В целом же, почвенный покров области разнообразен. По основным морфологическим и химическим свойствам (мощность гумусового горизонта, структура, механический и химический состав, выраженность

того или иного почвообразовательного процесса и хозяйственной ценности) выделяются автоморфные, полугидроморфные и гидроморфные типы почв.

Что касается геологического строения, территория Томской области расположена на юго–востоке Западной–Сибирской эпипалеозойской плиты, в строении которой выделяется фундамент и рыхлый мезозойско–кайнозойский чехол. Первый, в свою очередь, состоит из нижнего–складчатого этажа, сложенного метаморфизованными породами докембрия и палеозоя и верхнего, представленного комплексом отложений палеозоя и нижнего мезозоя (*География Томской области, 1988*). Мощность же рыхлых осадочных пород мезозойско–кайнозойского чехла изменяется в пределах области от нескольких метров до 5,5 км во впадинах.

Чрезвычайно важное значение при изучении брома на территории Томской области имеет именно ее геологическое, а также и гидрогеологическое строения, так как бром является типичным элементом – галогеном, т.е. солеобразователем, образующимся в условиях осадконакопления, и именно поэтому в соляных отложениях и рассолах он выступает геохимическим индикатором их генезиса (*Бром в соляных отложениях..., 1976*). Как показывает анализ данных по галогенным регионам мира, масштабы соленакопления в разные геологические эпохи характеризовались резкими различиями. В древние эпохи соленакопление бывало нередко значительно более интенсивным. Самым грандиозным являлось пермское соленакопление. Значительные количества солей отложились в кембрийское, девонское, триасовое, юрское, меловое и миоценовое время (*Общие проблемы галогенеза, 1985*). Необходимо отметить, что некоторые из отложений перечисленных выше периодов отмечаются и на территории Томской области (рисунок 5.2). Довольно трудным представляется подтверждение генезиса данных отложений. По мнению большинства исследователей, отложения данных периодов указывают на их морской генезис, тогда как другие авторы склоняются к версии приноса солей с континента, считая их генезис континентальным. Вынос и отложение солей отдельные исследователи связывают также с вулканизмом и термальными водами (*Общие проблемы галогенеза, 1985*). Однако, практически все исследователи придерживаются гипотезы эндогенного источника солей. Считается, что эндогенные глубинные рассолы доставлялись из верхней мантии в седиментационные бассейны, в которых они, благодаря глубинному подогреву, быстрее концентрировались и при охлаждении отлагали соли (*Общие проблемы галогенеза, 1985*).

СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ОКРУГ  
ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ  
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

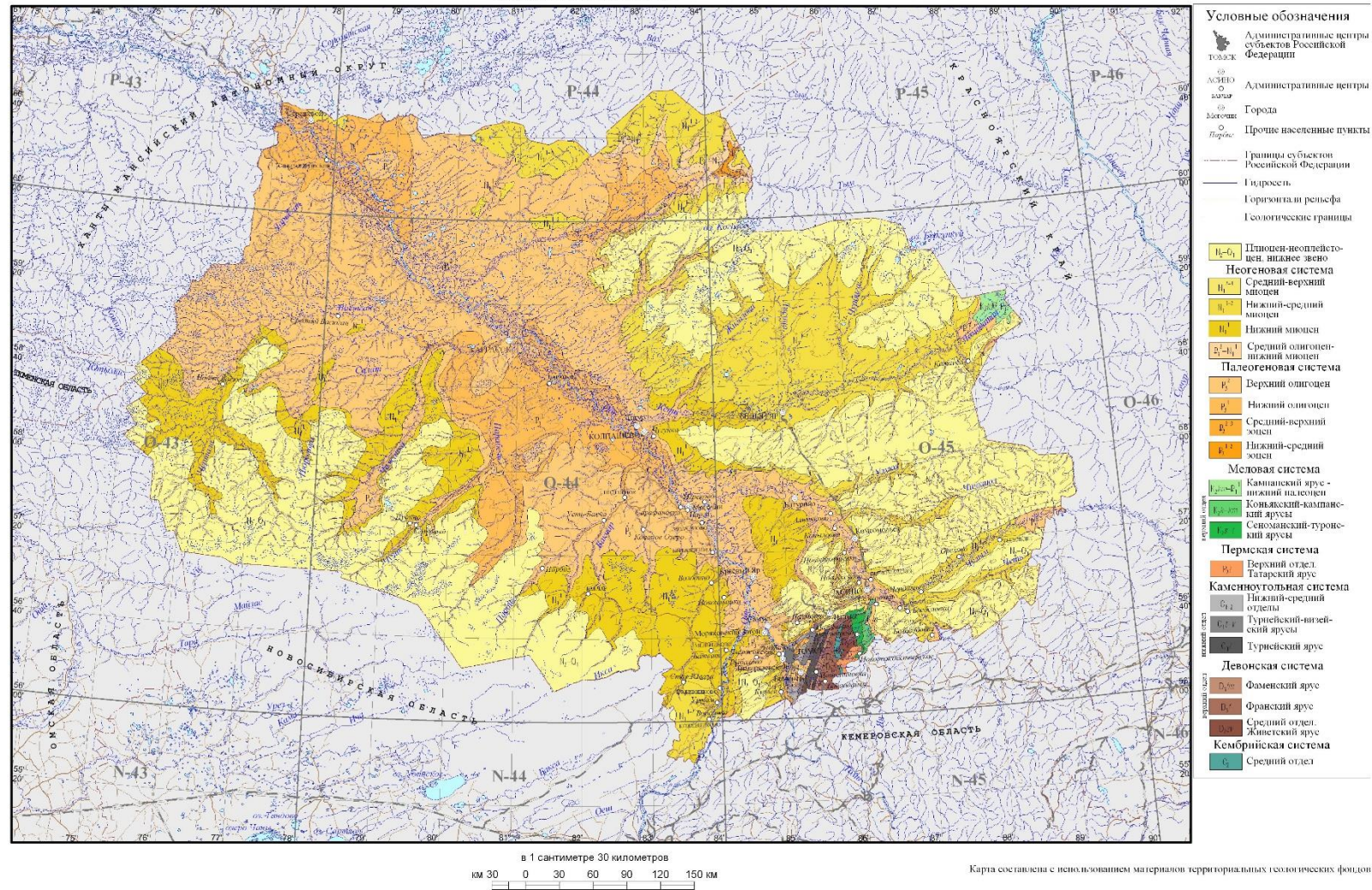


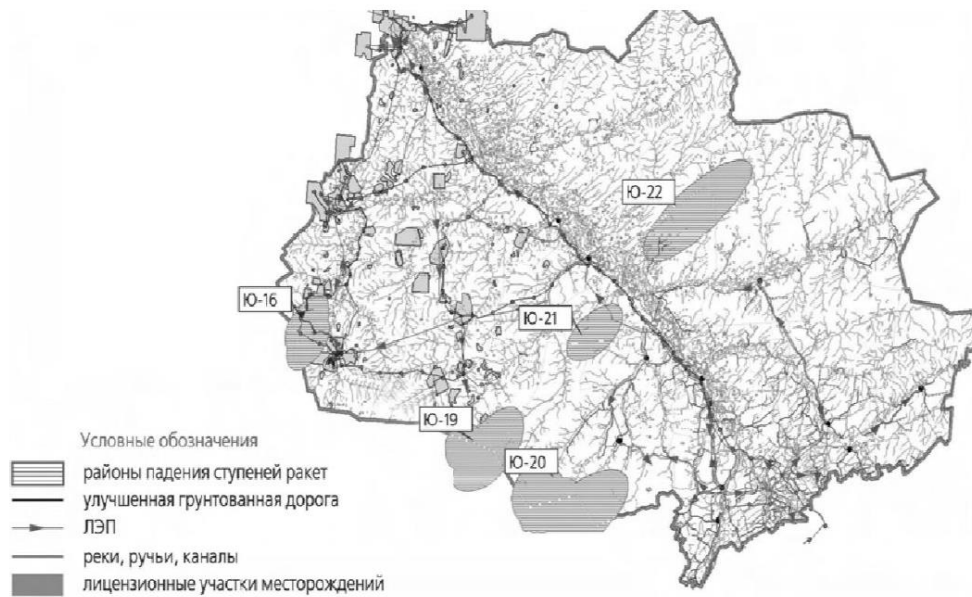
Рисунок 5.2 – Геологическое строение Томской области (по ВСЕГЕИ)



Зона пресных вод на территории области приурочена, в основном, к породам верхнего палеогена, неогена и четвертичного периода, при этом мощность зоны данных вод — уникальное образование, связанное с длительным на протяжении почти всего мезозоя и кайнозоя сохранением континентальных условий осадконакопления. Зона соленых вод представлена гидрокарбонатно-хлоридными и хлоридно-натриевыми водами, образовавшимися в морских бассейнах пониженной солености. Зона рассолов развита в западной, центральной и северной частях Томской области и приурочена к породам юры и палеозойского фундамента. Томская область богата бальнеологическими водами, в том числе бромными и йод-бромными, несколько меньше бромно-кремнистыми (*Евсеева, 2001*).

Вместе с тем, Томская область обладает довольно широким спектром полезных ископаемых, которые могут быть богаты бромом, в первую очередь, горючие полезные ископаемые. На территории области установлены проявления месторождений бурых углей, подразделяющиеся по возрасту на неогеновые, юрские и позднепалеозойские и расположенные, преимущественно, в юго-восточной части Обь-Иртышского угленосного бассейна (*Арбузов и др., 2007*). Около 18% запасов торфов России расположены в Томской области, где выявлено свыше 1300 торфяных месторождений. В области открыто свыше 100 месторождений углеводородного сырья, основными нефтегазоносными районами области являются Александровский, Каргасокский и Парабельский. На территории области имеются также месторождения рудных полезных ископаемых: железорудное Бакчарское месторождение (*Николаева, 1967; Пшеничкин, Домаренко, 2011*), циркон-ильменитовые россыпи (*Рихванов и др., 2001*), месторождения бокситов, цинка, золота и мн. др. (*Евсеева, 2001*). Они также представляют интерес при изучении брома, так как в виде редких бромидов элемент может встречаться в зонах окисления некоторых рудных месторождений.

Помимо широкого разнообразия природных факторов и условий Томской области, которые в значительной степени могут влиять на аккумуляцию брома, на территории области отмечаются и потенциальные антропогенные источники поступления элемента в окружающую среду. Они сосредоточены по территории всей области и связаны, в первую очередь, с эксплуатацией различных месторождений. Поступление брома в атмосферный воздух может быть также связано с использованием биомассы, углей, газа и т.д., используемых для отопительных целей. Отдельное внимание стоит также обратить и на районы падения отделяющихся частей ракет-носителей при пусках с космодрома «Байконур» (рисунок 5.4), что приводит к их загрязнению продуктами ракетного топлива, так как бром (пентафторида брома) широко используется как окислитель ракетного топлива (*Yoffe et al., 2013*).



**Рисунок 5.4** – Районы падения отделяющихся частей ракет-носителей в Томской области  
(*Экологический мониторинг...*, 2012).

Однако, среди всех районов Томской области особенный интерес представляет Томский район (рисунок 5.5). Пристальное внимание на него обращается уже несколько десятков лет (*Экология ...*, 1994; *Рихванов*, 1997; *Шатилов*, 2001; *Барановская, Рихванов*, 2002; *Барановская*, 2003; *Эколого-геохимические ...*, 2006; *Язиков*, 2006; *Таловская*, 2008; *Жорняк*, 2009; *Игнатова*, 2010; *Архангельский, Рихванов*, 2011; *Монголина*, 2011; *Барановская*, 2011; *Филимоненко*, 2015 и *мн.др.*) ввиду сложившейся здесь сложной экологической ситуации, обусловленной скоплением на относительно ограниченной территории значительного количества промышленных предприятий (зона Северного промышленного узла – СПУ) (*Экология ...*, 1994). В пределах данной зоны находятся свыше тридцати разно производственных комплексов, среди которых имеются и потенциальные источники брома: крупнейшее в мире предприятие ядерно-топливного цикла – Сибирский химический комбинат (СХК), а также крупнейший в России комбинат по нефтегазовой переработке – «Сибур» (ранее – Томский нефтехимический комбинат – ТНХК). К другим возможным источникам брома в Томском районе можно отнести также и несколько других предприятий следующих отраслей: нефтехимической и химической («Сибметтахим», «Томскгазпром»), фармацевтической («Фармстандарт-Томскхимфарм»), а также теплоэнергетической (Томская ГРЭС-2, ТЭЦ-3).





**Рисунок 5.5** – Схема размещения основных промышленных производств на территории Томского района (Язиков, 2006)

*Примечание: 1 – промпредприятия: 1) – Томский нефтехимический комбинат; 2) – ТЭЦ-3; 3) – теп-личный комбинат; 4) – очистные сооружения ТНХК; 5) – золоотвал ТЭЦ-3; 6) – полигон промотходов; 8) – животноводческая ферма совхоза-техникума; 9) – база СУ-13 управления «Химстрой»; 10) – база газоотдачи магистр. газопровода; 11) – база агропромстроя; 12) – Межениновская птицефабрика; 13) – совхоз «Томский»; 14) – помехохранилище Межениновской п/ф; 15) – городская свалка; 16) – пруд-накопитель свинокомплекса; 17) – Туганская птицефабрика; 18) – угольный склад; 19) – поля орошения свинокомплекса; 20) – ЗАО «ТИЗ»; 21) – АОТ «Ролтом»; 22) – ЗАО «Сибкабель»; 23) – ОАО «Шпалозавод»; 24) – ЗАО «Дрожжзавод»; 25) – ГРЭС-2; 26) – АБЗ («Ашот») (производство строительных материалов); 27) – Судоремонтный завод; 28) – Колбасный цех «Рыболовский»; 29) – АБЗ; 2 – площадки ЖРАО; 3 – эксплуатационные скважины водозаборов; 4 – линии связи; 5 – трубопровод; 6 – линии электропередач; 7 – автомобильные дороги; 8 – железная дорога; 9 – границы медицинских округов*

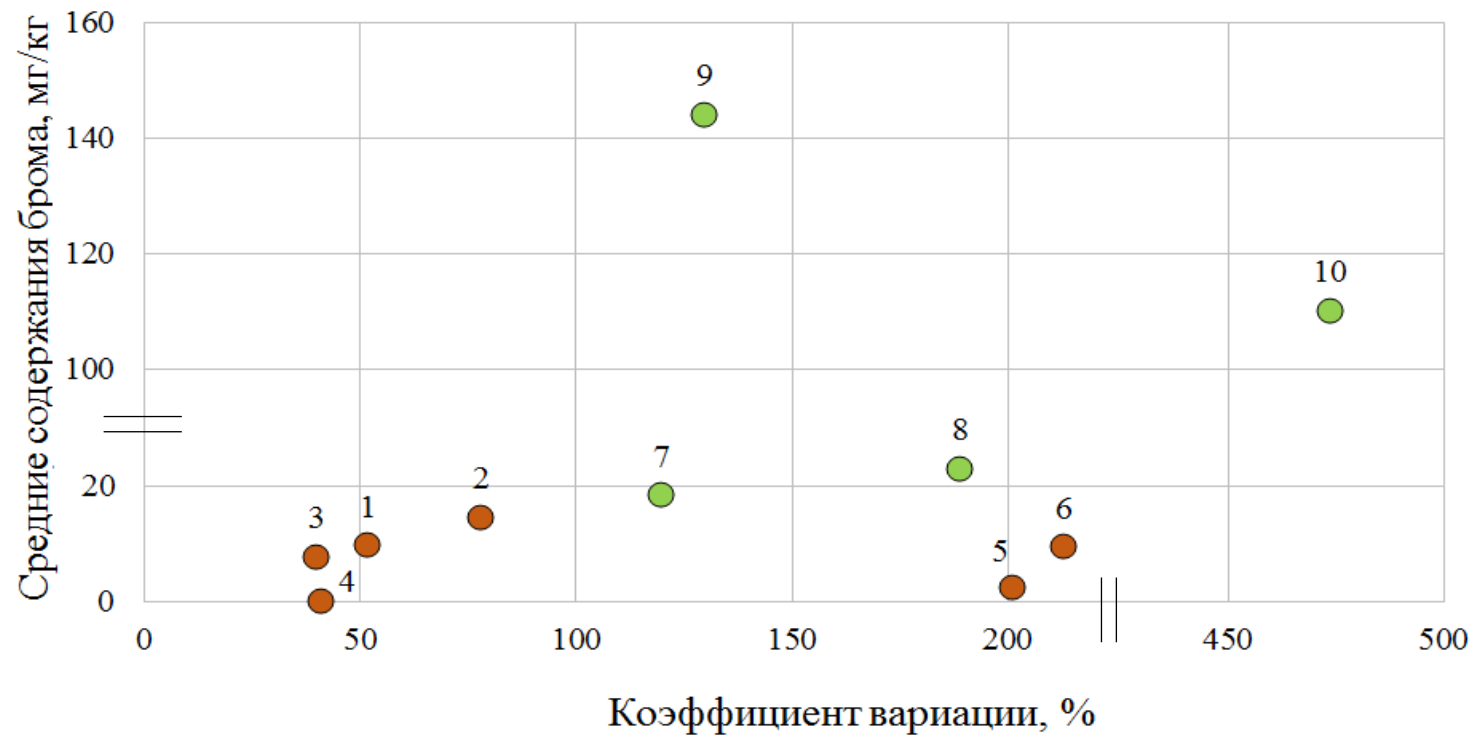
*Таким образом, совокупность природно-антропогенных условий территории Томской области характеризуется достаточной неоднородностью, что способствует формированию различных геохимических условий и факторов, обуславливающих особенности накопления, распределения, закономерностей миграции брома в окружающей среде, а также определяет многофакторность путей его поступления.*

## ГЛАВА 6. ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БРОМА В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

На основе имеющегося фактического материала, нами был осуществлен анализ накопления и распределения брома в биотических и абиотических компонентах биогеоценозов Томской области (рисунок 6.1). Представленные данные позволяют провести довольно четкую дифференциацию по уровням концентрирования брома в различных объектах исследования.

Так, например, отчетливо видно, что содержания брома в углях, почвах, питьевых водах и донных отложениях области не превышают 20 мг/кг (мг/л для питьевых вод) при относительно низком коэффициенте вариации: при этом для всех объектов он составляет не более 50%, а только для почв – 79%. На данные объекты исследования стоит обратить отдельное внимание, так как они являются одними из первых звеньев биогеохимической миграции химических элементов. Ко второй группе можно отнести накипь питьевых вод и твердый осадок снега, средние содержания которых также не превышают 20 мг/кг, однако значения коэффициентов вариации находятся в пределах 200 – 250%.

В отличие от биокосного и биогенного вещества, на примере которых ярко выражена относительная геохимическая однородность накопления брома, абсолютно противоположная картина отмечается при детальном рассмотрении отдельных составляющих сложноорганизованной системы, каковой является живое вещество. Для него отчетливо выражена геохимическая мозаичность (хаотичность) аккумуляирования галогена, что проявляется в диапазоне концентраций элемента от 18,3 мг/кг в микроорганизмах до 144 мг/кг в наземных животных при изменении коэффициента вариации от 120 до 474%, с максимальной вариативностью в волосах детей. Это свидетельствует, в первую очередь, о том, что живые организмы способны концентрировать достаточно высокие количества элемента и могут быть яркими показателями–индикаторами происходящих в природе изменений, обуславливающих поступление элемента из окружающей среды, как под влиянием природных факторов, так и в условиях антропогенной деятельности.

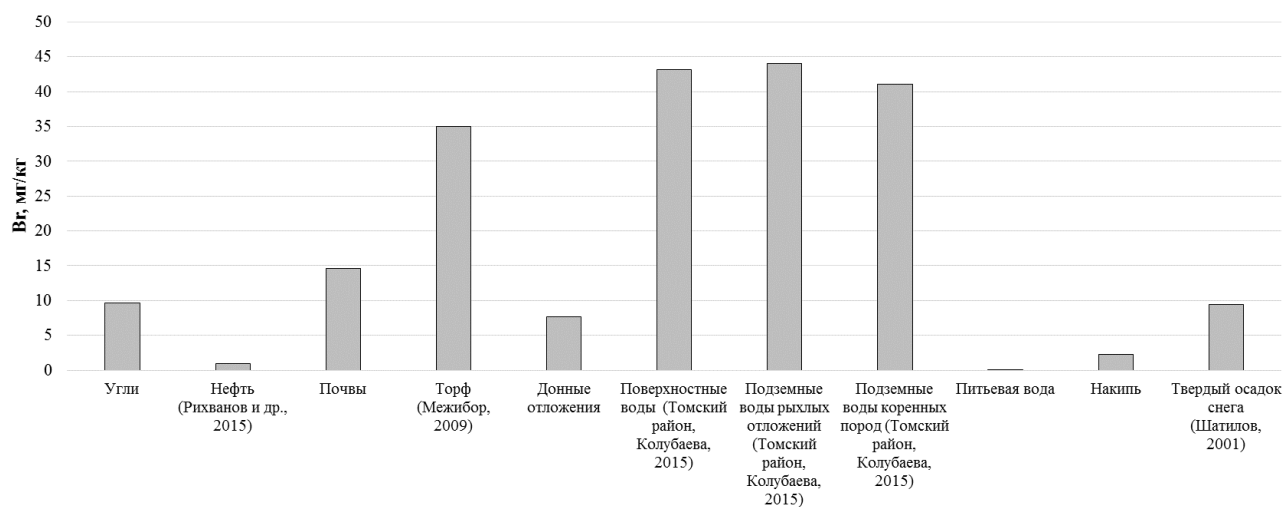


**Рисунок 6.1** – Уровни накопления брома (средние содержания) в абиотических и биотических компонентах окружающей среды Томской области, мг/кг

Примечание: 1 – угли, 2 – почвы, 3 – донные отложения, 4 – питьевая вода (мг/л), 5 – накипь питьевых вод, 6 – твердый осадок снега (данные по Западно-Сибирскому региону по Шатилову, 2001), 7 – микроорганизмы минеральных источников, 8 – растительные организмы, 9 – животные организмы, 10 – организм человека; коричневым цветом выделены абиотические компоненты, зеленым – биотические.

### 6.1 Особенности накопления и распределения брома в абиотических компонентах

Детальная характеристика уровней накопления брома в абиотических компонентах окружающей среды Томской области представлена на рисунке 6.2.



**Рисунок 6.2** – Средние содержания брома в абиотических компонентах окружающей среды, мг/кг (мг/л в водных объектах)

Содержания брома в углях Томской области превышают его кларковые содержания в них (Юдович, Кетрис, 2006), однако, не превышают содержания элемента в углях Кузбасса, Бельгии, и тем более, чрезвычайно богатых бромом углей Болгарии и Украины (см. таблицу 2.4). Довольно низкими, по сравнению, с литературными данными, являются концентрации брома в нефти Томской области, о чем мы не беремся судить в рамках данной работы.

#### Почвы

Анализ статистических параметров (таблица 6.1.) наряду с пространственным распределением брома в почвах Томской области (рисунок 6.3) указывают на относительную однородность концентраций элемента в почвах районов Томской области. Наименьшие содержания галогена отмечаются в почвах Томского района, а наибольшие характерны для почв Кожевниковского и Бакчарского районов области. Стоит отметить, что в последнем, повышенные уровни накопления элемента в почвах отмечаются во всех без исключения изученных нами населенных пунктах (Перминова и др., 2017; Шайхиев, 2017).

**Таблица 6.1** – Статистические параметры распределения содержаний брома в почвах районов Томской области, мг/кг

Район	N	X	$\lambda$	Min	Max	Mo	Me	V, %
Парабельский	6	14,8	1,7	9,0	22,1	–	14,5	29
Колпашевский	6	11,9	2,1	7,5	21,3	–	10,4	43
Чаинский	16	15,3	2,0	5,0	31,8	5,0	13,1	54
Молчановский	5	14,5	1,1	11,1	18,0	–	14,4	17
Кривошеинский	2	16,8	3,8	13,0	20,1	–	16,8	32

Шегарский	2	14,3	1,3	13,0	15,6	–	14,3	13
Кожевниковский	33	29,8	1,5	0,5	35,8	–	18,8	47
Томский	182	9,1	0,4	0,5	59,5	0,5	8,9	65
Асиновский	15	19,7	1,8	5,0	31,8	23,4	20,8	35
Первомайский	5	15,6	3,2	5,0	23,9	14,4	14,4	46
Верхнекетский	14	13,6	2,2	4,4	30,1	–	10,7	60
Тегульдетский	20	13,2	1,4	5,0	28,0	5,0	12,4	48
Зырянский	44	10,8	1,0	3,9	34,4	6,1	8,6	62
Бакчарский	39	40,3	1,9	15,2	64,9	–	41,3	29
Томская область	389	14,5	0,6	0,5	64,9	0,5	11,1	79

Примечание:  $\bar{X}$  – среднее значение;  $\lambda$  – стандартная ошибка;  $Min$  и  $Max$  – минимальное и максимальное значения соответственно,  $Mo$  – мода,  $Me$  – медиана,  $V$  – коэффициент вариации,  $N$  – количество проб.

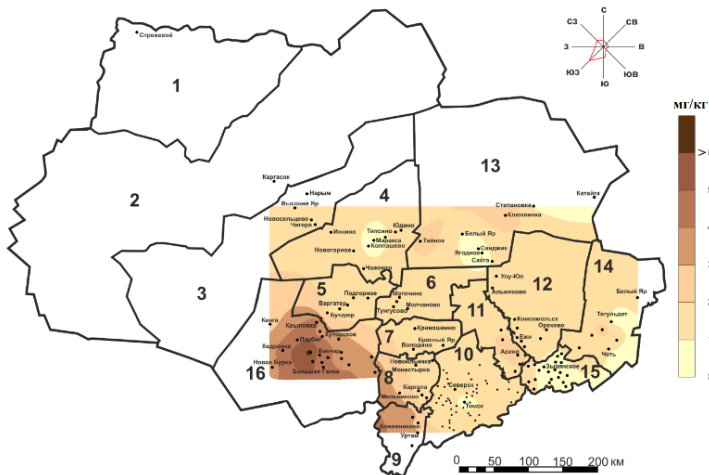


Рисунок 6.3 – Схематическая карта распределения брома (мг/кг) в почвах Томской области

Примечание (районы): 1 – Александровский, 2 – Каргасокский, 3 – Парабельский, 4 – Колпашевский, 5 – Чаинский, 6 – Молчановский, 7 – Кривошеинский, 8 – Шегарский, 9 – Кожевниковский, 10 – Томский, 11 – Асиновский, 12 – Первомайский, 13 – Верхнекетский, 14 – Тегульдетский, 15 – Зырянский, 16 – Бакчарский.

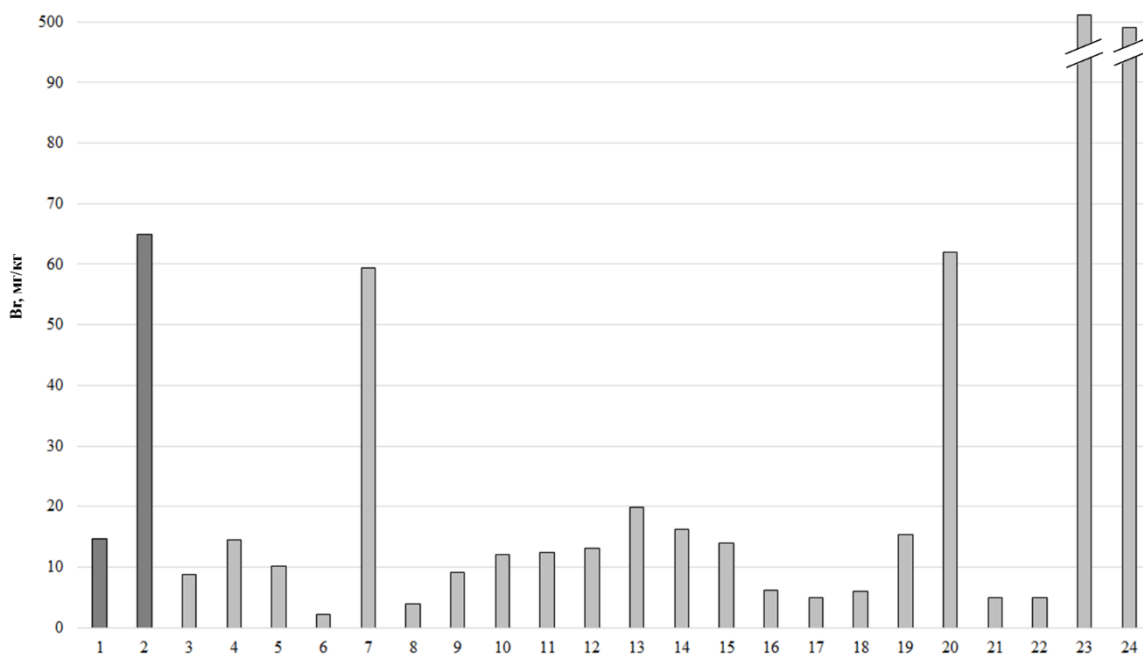
Об обогащении почв Томской области бромом можно также судить, исходя из рассчитанных коэффициентов концентрации химических элементов, относительно фоновых значений по заказнику «Томский» (Язиков, 2006). Значения коэффициентов концентрации брома превышают 10 единиц для почв практически всех районов области, а его вклад в суммарный показатель загрязнения изменяется от 12,6 до 43,6 % (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Значения коэффициентов концентраций химических элементов и вклад брома в суммарный показатель загрязнения почв населенных пунктов районов Томской области

Район	Коэффициент концентрации			Вклад Br (%) в СПЗ
	1-5	5-10	>10	
Парабельский	(Ba,Tb) <sub>4,8</sub> Ta <sub>4,4</sub> Ca <sub>4,3</sub> U <sub>3,8</sub> Au <sub>3,3</sub> Rb <sub>2,9</sub> Sb <sub>2,6</sub> Cs <sub>2,3</sub> (Yb,Hf) <sub>2,1</sub> Na <sub>1,9</sub> (Cr,Lu) <sub>1,8</sub> Co <sub>1,7</sub> (Fe,Th) <sub>1,5</sub> Ce <sub>1,3</sub> (La,Sr,Sm) <sub>1,2</sub>	Ag <sub>8,0</sub>	<b>Br</b> <sub>12,3</sub>	24,2%

Колпашевский	Tb <sub>4,4</sub> Sb <sub>4,2</sub> Ta <sub>4,1</sub> Ca <sub>4,0</sub> U <sub>3,9</sub> Rb <sub>3,2</sub> Na <sub>2,7</sub> Hf <sub>2,6</sub> Cr <sub>2,4</sub> (Lu,Au) <sub>2,3</sub> Yb <sub>2,1</sub> Cs <sub>1,7</sub> (Fe,Co,Sr) <sub>1,6</sub> Th <sub>1,5</sub> (Ce,Sm) <sub>1,4</sub> La <sub>1,2</sub>	<b>Br</b> <sub>9,9</sub> Ag <sub>8,0</sub> Ba <sub>5,8</sub>		19,1%
Чаинский	Ba <sub>4,9</sub> Sb <sub>4,4</sub> Ag <sub>4,0</sub> Lu <sub>3,8</sub> Yb <sub>3,7</sub> Cs <sub>2,9</sub> Co <sub>2,4</sub> (Na,Fe) <sub>2,3</sub> (Cr,Th) <sub>1,9</sub> (Hf,La) <sub>1,7</sub> Sm <sub>1,6</sub> Ce <sub>1,5</sub> Sc <sub>1,3</sub> Sr <sub>1,1</sub>	Ta <sub>8,3</sub> Rb <sub>8,0</sub> Ca <sub>7,9</sub> Tb <sub>7,2</sub> U <sub>6,9</sub> Au <sub>5,9</sub>	<b>Br</b> <sub>12,7</sub>	16,5%
Молчановский	Sb <sub>4,5</sub> Ag <sub>4,0</sub> Rb <sub>3,4</sub> (Cr,Yb) <sub>3,2</sub> Ca <sub>3,0</sub> Cs <sub>2,8</sub> Lu <sub>2,6</sub> Na <sub>2,4</sub> (Fe,Co) <sub>2,1</sub> Th <sub>1,8</sub> (Ce,Sm) <sub>1,7</sub> (La,Hf) <sub>1,6</sub> (Sr,Au) <sub>1,4</sub> Sc <sub>1,2</sub>	Tb <sub>8,9</sub> Ta <sub>8,9</sub> U <sub>6,2</sub> Ba <sub>5,4</sub>	<b>Br</b> <sub>12,1</sub>	18,8%
Кривошеинский	(Rb,Ag) <sub>4,0</sub> Cr <sub>3,6</sub> U <sub>3,5</sub> Yb <sub>3,1</sub> Au <sub>3,0</sub> Sb <sub>2,6</sub> Ca <sub>2,3</sub> Cs <sub>2,2</sub> (Na,Lu) <sub>2,1</sub> (Fe,Co) <sub>1,9</sub> Sm <sub>1,8</sub> (Ce,Th) <sub>1,6</sub> Hf <sub>1,5</sub> La <sub>1,3</sub> Sc <sub>1,1</sub>	Ta <sub>7,7</sub> Tb <sub>6,5</sub> Ba <sub>5,8</sub>	<b>Br</b> <sub>14,0</sub>	24,5%
Шегарский	Sb <sub>4,5</sub> Ag <sub>4,0</sub> Cs <sub>3,9</sub> Rb <sub>3,2</sub> Ca <sub>3,0</sub> Yb <sub>2,9</sub> Cr <sub>2,7</sub> Na <sub>2,4</sub> Lu <sub>2,3</sub> Fe <sub>2,2</sub> Co <sub>2,0</sub> Au <sub>1,9</sub> Th <sub>1,7</sub> Ce <sub>1,6</sub> (La,Hf) <sub>1,5</sub> Sm <sub>1,4</sub> Sc <sub>1,2</sub>	Ta <sub>7,7</sub> Tb <sub>7,5</sub> U <sub>6,3</sub> Ba <sub>5,5</sub>	<b>Br</b> <sub>11,9</sub>	19,6%
Кожевниковский	Rb <sub>4,8</sub> Ca <sub>3,6</sub> Cs <sub>3,4</sub> Yb <sub>3,3</sub> Sb <sub>3,0</sub> Cr <sub>2,6</sub> Lu <sub>2,5</sub> (Fe, Ba) <sub>2,4</sub> U <sub>2,3</sub> (Na,Co) <sub>2,2</sub> Th <sub>2,1</sub> (As,Ce) <sub>1,8</sub> (La,Hf) <sub>1,6</sub> Sc <sub>1,5</sub> Ag <sub>1,4</sub> Sm <sub>1,3</sub>	Tb <sub>5,5</sub> Ta <sub>5,3</sub>	<b>Br</b> <sub>15,1</sub>	29,2%
Томский	U <sub>4,9</sub> (Au,Rb) <sub>4,7</sub> Ba <sub>4,4</sub> Ca <sub>3,7</sub> Yb <sub>3,0</sub> Cs <sub>2,9</sub> Cr <sub>2,6</sub> (Na,Lu) <sub>2,5</sub> Fe <sub>2,4</sub> Co <sub>2,2</sub> Th <sub>2,0</sub> Hf <sub>1,8</sub> Ce <sub>1,7</sub> (Sm,La) <sub>1,5</sub> Sc <sub>1,4</sub>	<b>Br</b> <sub>7,8</sub> Tb <sub>7,7</sub> Sb <sub>7,1</sub> Ag <sub>5,6</sub> Ta <sub>5,2</sub>		12,6%
Асиновский	Lu <sub>4,5</sub> Yb <sub>3,6</sub> Ba <sub>3,3</sub> Cs <sub>2,9</sub> Na <sub>2,8</sub> (Fe,Co) <sub>2,1</sub> Ag <sub>2,0</sub> Th <sub>1,7</sub> (Cr,La,Sm,Hf) <sub>1,5</sub> (Sc,As,Ce) <sub>1,3</sub> Sr <sub>1,1</sub>	Ca <sub>8,2</sub> Rb <sub>7,9</sub> Ta <sub>7,6</sub> U <sub>6,6</sub> Au <sub>6,5</sub> Tb <sub>5,6</sub> Sb <sub>5,4</sub>	<b>Br</b> <sub>16,4</sub>	21,5%
Первомайский	Lu <sub>4,0</sub> Yb <sub>3,4</sub> Na <sub>2,6</sub> Sr <sub>2,5</sub> As <sub>2,2</sub> (Fe, Co) <sub>1,5</sub> (La,Hf) <sub>1,4</sub> (Cs,Sm) <sub>1,2</sub> Th <sub>1,1</sub>	Ca <sub>9,7</sub> Au <sub>8,0</sub> Rb <sub>7,4</sub> Ta <sub>6,6</sub> Tb <sub>6,5</sub> Sb <sub>6,3</sub> U <sub>5,6</sub> Ba <sub>5,2</sub>	<b>Br</b> <sub>13,0</sub>	18,0%
Верхнекетский	Ba <sub>3,9</sub> Cr <sub>3,5</sub> Ta <sub>3,3</sub> Tb <sub>3,0</sub> Rb <sub>2,8</sub> U <sub>2,5</sub> (Na,Ca) <sub>2,0</sub> Sb <sub>1,9</sub> Au <sub>1,8</sub> (Sr,Yb) <sub>1,5</sub> (Cs,Lu,Hf) <sub>1,3</sub>	Ag <sub>5,3</sub>	<b>Br</b> <sub>11,3</sub>	33,0%
Тегульдетский	(Sb,Tb) <sub>4,7</sub> U <sub>4,6</sub> As <sub>3,8</sub> Ba <sub>3,7</sub> Rb <sub>3,2</sub> (Cs,Yb) <sub>2,6</sub> (Ag,Lu) <sub>2,0</sub> Co <sub>1,9</sub> (Na,Fe) <sub>1,6</sub> Sr <sub>1,5</sub> (Hf,Th) <sub>1,3</sub> (La,Ce,Sm) <sub>1,2</sub>	Au <sub>8,1</sub> Ca <sub>7,6</sub> Ta <sub>5,8</sub> Cr <sub>5,2</sub>	<b>Br</b> <sub>11,0</sub>	18,0%
Зырянский	Tb <sub>4,4</sub> Ca <sub>4,2</sub> Ba <sub>4,0</sub> (Rb,U) <sub>3,7</sub> Sb <sub>3,6</sub> Ta <sub>3,1</sub> Cr <sub>3,0</sub> Ag <sub>2,8</sub> (Yb,Lu) <sub>2,1</sub> Cs <sub>1,9</sub> Fe <sub>1,6</sub> (Na,Co) <sub>1,4</sub> Th <sub>1,3</sub> (La,Ce) <sub>1,2</sub> Hf <sub>1,1</sub>	<b>Br</b> <sub>9,0</sub> Au <sub>5,6</sub>		21,2%
Бакчарский	Rb <sub>4,6</sub> U <sub>4,5</sub> Ag <sub>4,0</sub> (Sb,Cs) <sub>3,4</sub> (Ca, Ba) <sub>3,1</sub> (Co,Yb) <sub>2,5</sub> Au <sub>2,4</sub> Lu <sub>2,3</sub> Cr <sub>2,2</sub> Th <sub>2,1</sub> Fe <sub>2,0</sub> Ce <sub>1,7</sub> Na <sub>1,6</sub> La <sub>1,5</sub> (Sm,Hf) <sub>1,4</sub> Sc <sub>1,3</sub> Sr <sub>1,1</sub>	Ta <sub>7,3</sub> Tb <sub>6,0</sub>	<b>Br</b> <sub>32,9</sub>	43,6%

При этом, как показывает сравнительный анализ (рисунок 6.4), средние содержания элемента в почвах Томской области превышают содержания, обнаруженные в почвах некоторых регионов России и зарубежья. Максимальные же концентрации галогена, характерные для почв Бакчарского района области, намного выше концентраций Вг практически всех рассматриваемых почв, за исключением Великобритании и Японии, для которых характерны абсолютно иные геоморфологические и климатогеографические условия территории, а также близость к морю и вулканический привнос материала (Перминова и др., 2017).



**Рисунок 6.4** – Содержание брома в почвах регионов России и зарубежья, мг/кг

*Примечание: 1 – Томская область (средние содержания), 2 – Томская область (максимальные содержания, Бакчарский район), 3 – г. Томск, 4 – г. Челябинск, 5 – г. Павлодар, 6 – респ. Бурятия, 7 – Западная Сибирь, 8 – Васюганская равнина, 9 – Кулундинская равнина (чернозем), 10 – Юго-Восточное Забайкалье, 11 – Барабинская равнина, 12 – Приобское плато (чернозем), 13 – г. Пиза, 14 – г. Ливорно, 15 – Норвегия, 16 – Франция, 17 – Китай, 18 – США, 19 – Иордания (без фумигантов), 20 – Иордания (с фумигантами), 21 – почвы мира, 22 – кларк для почв, 23 – Великобритания, 24 – Япония (Перминова и др., 2017).*

Мы не можем однозначно утверждать о генезисе высоких концентраций брома в почвах Кожевниковского и Бакчарского районов. С одной стороны, Бакчарский район расположен в южной части области, где обнаруживаются отделяющиеся части ракет-носителей при пусках с космодрома «Байконур», в связи с чем фиксируется загрязнение компонентов окружающей среды продуктами ракетного топлива (рисунок 5.4). Факт использования брома (пентафторида брома) как окислителя ракетного топлива широко известен (*Yoffe et al., 2013*). Однако, противоречивым является тот факт, что повышенные содержания элемента не наблюдаются в почвах других районов области, которые также являются районами падения частей ракет-носителей.

С другой стороны, мы не можем исключать и воздействие природных источников. Некоторыми авторами отмечается, что поступление брома на земную поверхность может происходить с рассолами из земных недр (включая мантию) по глубинным разломам (*Бакиев, 2006*). В обоих районах области, которые частично находятся в пределах Барабинско - Пихтовой мегамоноклизы, расположенной между Томской и Новосибирской областью, наблюдаются несколько глубинных разломов (*Евсеева, 2001; Белкин А.Д., 2017; Тектоника..., 2017*). На

возможный перенос брома в гидротермальных растворах также указывают данные *А.Г. Миронова и С.М. Жмодика (1991)*, согласно которым, он способен переходить во флюидную фазу в силу своей низкой растворимости в кислом расплаве. По – видимому почвы, также, как и снежный покров (*Соболев, 2013*) способны отражать геохимические аномалии эндогенного характера.

Коэффициенты парной корреляции в почвах Кожевниковского и Бакчарского районов (таблица 6.3) указывают на ассоциации брома с элементами, сопутствующими органическому веществу (Ba, Sc, TR, U и др.). Подобно рода ассоциации элементов характерны, например, для плантоногенных отложений Баженовской свиты, образовавшихся в результате седиментационно–диагенетического накопления (*Гавшин, 1984*). По–видимому, ассоциации брома в почвах двух районов можно рассматривать, как закономерные и сложившиеся в итоге седиментации и диагенеза в морской среде, что еще раз доказывает возможное поступление элемента с рассолами из земных недр.

*Таблица 6.3 – Коэффициенты парной корреляции брома с химическими элементами в почвах и торфах районов Томской области*

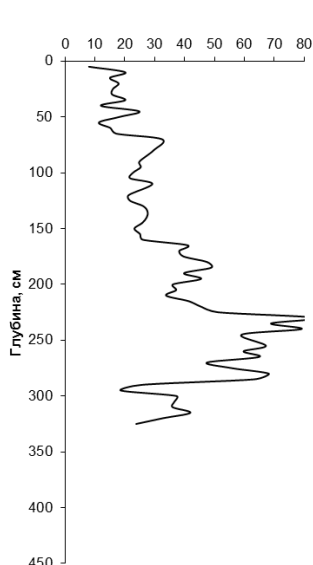
Элементы	Районы								
	Чаинский	Кожевниковский	Томский	Асиновский	Верхнекетский	Тегульдетский	Зырянский	Бакчарский	Бакчарский
	Почвы								Торф (по Межибор, 2009)
Na	0,22	<b>0,27</b>	0,18	<b>0,34</b>	<b>0,78</b>	0,19	0,11	<b>0,37</b>	<b>0,15</b>
Ca	0,55	<b>0,03</b>	0,4	0,33	<b>0,75</b>	0,42	<b>0,53</b>	<b>0,51</b>	<b>0,87</b>
Sc	<b>0,92</b>	<b>0,24</b>	0,4	<b>0,33</b>	<b>0,85</b>	0,01	0,19	<b>0,37</b>	<b>0,07</b>
Cr	0,58	<b>0,29</b>	0,29	<b>0,1</b>	0,21	<b>0,54</b>	<b>0,36</b>	<b>0,33</b>	<b>0,08</b>
Fe	<b>0,2</b>	<b>0,19</b>	0,42	<b>0,75</b>	<b>0,8</b>	0,12	0,17	<b>0,34</b>	<b>0,29</b>
Co	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,32	<b>0,54</b>	<b>0,8</b>	0,43	0,16	0,21	0,13
As	<b>0,08</b>	<b>0,22</b>	0,26	–	<b>0,12</b>	–	–	<b>0,23</b>	–
Rb	<b>0,87</b>	<b>0,03</b>	0,37	<b>0,61</b>	<b>0,02</b>	0,19	0,16	0,29	<b>0,13</b>
Sr	–	<b>0,37</b>	0,13	–	0,15	0,18	0,22	0,28	<b>0,53</b>
Ag	–	0,27	<b>0,02</b>	–	0,16	–	0,04	–	<b>0,13</b>
Sb	0,29	0,19	0,07	<b>0,56</b>	0,03	0,08	0,24	0,26	<b>0,06</b>
Cs	<b>0,52</b>	0,11	0,14	<b>0,26</b>	<b>0,64</b>	<b>0,02</b>	0,15	0,21	<b>0,09</b>
Ba	0,28	<b>0,36</b>	0,05	<b>0,19</b>	0,51	<b>0,01</b>	0,02	<b>0,4</b>	0,18
La	<b>0,35</b>	<b>0,3</b>	0,5	<b>0,65</b>	<b>0,86</b>	<b>0,48</b>	0,14	<b>0,49</b>	<b>0,03</b>
Ce	<b>0,13</b>	<b>0,36</b>	0,29	<b>0,65</b>	<b>0,87</b>	0,14	0,05	<b>0,33</b>	<b>0,05</b>
Sm	0,34	0,03	<b>0,55</b>	0,06	<b>0,7</b>	0,43	0,24	<b>0,4</b>	<b>0,02</b>
Eu	0,51	<b>0,24</b>	0,34	<b>0,23</b>	<b>0,54</b>	<b>0,5</b>	0,14	0,23	<b>0,03</b>
Tb	<b>0,72</b>	<b>0,17</b>	<b>0,53</b>	<b>0,25</b>	<b>0,79</b>	0,4	0,13	<b>0,41</b>	<b>0,04</b>
Yb	0,22	<b>0,14</b>	0,34	<b>0,55</b>	<b>0,84</b>	<b>0,51</b>	0,24	<b>0,55</b>	<b>0,02</b>



<b>Lu</b>	<b>0,65</b>	<b>0,22</b>	0,46	<b>0,66</b>	<b>0,91</b>	0,43	0,15	<b>0,39</b>	<b>0,05</b>
<b>Hf</b>	<b>0,22</b>	<b>0,42</b>	0,2	<b>0,61</b>	<b>0,68</b>	0,04	0,02	0,27	<b>0,06</b>
<b>Ta</b>	0,13	0,14	0,09	<b>0,73</b>	<b>0,69</b>	<b>0,01</b>	0,11	0,03	<b>0,10</b>
<b>Au</b>	<b>0,85</b>	0,23	0,4	0,08	0,08	0,04	<b>0,05</b>	0,06	<b>0,42</b>
<b>Th</b>	<b>0,41</b>	<b>0,18</b>	0,37	0,08	<b>0,78</b>	0,14	0,17	<b>0,43</b>	<b>0,07</b>
<b>U</b>	<b>0,64</b>	<b>0,36</b>	<b>0,31</b>	<b>0,6</b>	<b>0,8</b>	0,12	0,14	<b>0,46</b>	<b>0,42</b>

Примечание: рассматривались только те районы области, в которых было отобрано минимум 10 проб; уровень вероятности – 95%; отрицательные корреляционные связи выделены красным цветом; значимые положительные связи показаны жирным шрифтом.

Примечательно, что исследованиями А. М. Межибор (2009) по изучению болот Томской области было показано, что болото Бакcharское, расположенное в Бакcharском районе, также



характеризуется самыми высокими содержаниями брома относительно изучаемых торфов области. Средние содержания Br в нем составляют 35,4 мг/кг сухого вещества, при этом накапливается он преимущественно в нижних слоях (рисунок 6.5), что указывает на природный источник его поступления. Кроме того, отмечаются идентичные геохимические ассоциации брома с кальцием, железом, и ураном в почвах и торфах Бакcharского района (таблица 6.3).

**Рисунок 6.5** – Распределение брома с глубиной в Бакcharском болоте (Межибор, 2009)

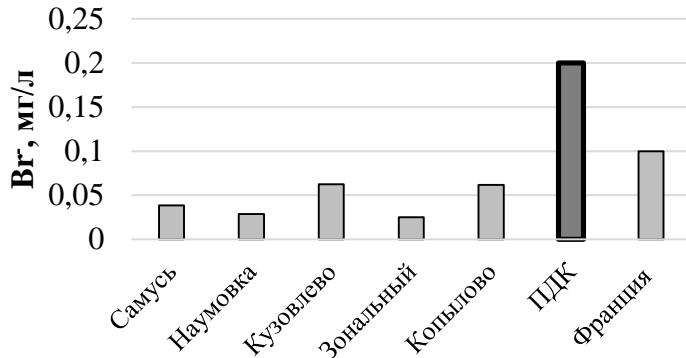
Таким образом можно заключить, что почвы Томской области обогащены бромом, а его распределение в них является достаточно однородным. Наименьшие содержания элемента отмечаются в Томском районе области, а наибольшие – в Кожевниковском и Бакcharском. Анализ имеющегося литературного материала позволяет предположить о возможном природном генезисе брома в почвах двух последних районов, обусловленном поступлением элемента в виде флюидов/в газовой форме с рассолами из земных недр по глубинным разломам.

#### **Воды и накипь питьевых вод**

Анализ рисунка 6.2 показывает, что наибольшие содержания элемента отмечаются в природных естественных подземных и поверхностных водах области, отвечающих фоновому уровню и расцениваемых как свойственные экологически чистым районам (Колубаева, 2015). Более низкие концентрации элемента характерны для питьевой воды.

Фактический материал по изучению питьевых вод в 5 населенных пунктах Томской области позволяет заключить, что уровни накопления брома (Br) в воде не характеризуются аномальными содержаниями элемента и не превышают предельно-допустимых концентраций,

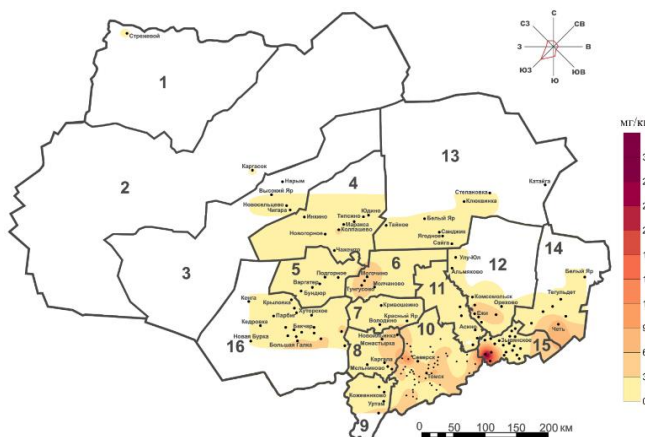
установленных для бромид-иона в питьевой воде (*СанПин 2.1.4.1116-02*). Кроме того, дополнительные пробы питьевой воды, отобранные во Франции демонстрируют, что концентрации элемента в питьевой воде населенных пунктов Томской области являются более низкими (рисунок 6.6).



**Рисунок 6.6** – Содержание брома ( $Br^-$ ) в питьевых водах (мг/л) населенных пунктов Томского района и Франции с указанием ПДК для питьевых вод

Накопление брома в накипи питьевых вод может быть обусловлено процессами испарения, которые широко распространены для брома в природных обстановках (*А.И. Перельман, 1972*). Высокая температура кипячения воды в совокупности с некоторыми специфическими физико - химическими свойствами элемента, как например, высокая величина давления насыщенного пара – 28700 Па при 25°C, которая определяет летучесть брома (для сравнения: величина давления насыщенного пара для ртути составляет 0, 264 Па при 25°C), а также тот факт, что бром является очень подвижным элементом в водах любого химического состава (*А.И. Перельман, 1972*), могут обуславливать формирование геохимического испарительного барьера в бытовых условиях, способствующего аккумуляции элемента в накипи. Таким образом, с крайней осторожностью стоит подходить к анализу особенностей накопления брома в данном объекте исследований.

Анализ пространственного распределения брома в накипи питьевых вод на территории Томской области (рисунок 6.7), а также статистические параметры (таблица 6.4) указывают на неоднородное распределение элемента, которое, в отличие от почв, носит очаговый характер.



**Рисунок 6.7** – Схематическая карта распределения брома (мг/кг) в накипи питьевых вод Томской области

На территории Томской области отмечаются сразу несколько аномальных геохимических полей, причем одно из них выделяется по непрерывности своей распространенности от Зырянского до Шегарского района области, проходя и фиксируясь, в большей степени, в Томском районе. Минимальные уровни накопления брома в накипи питьевых вод отмечаются в Каргасокском районе области, а наибольшие – в Томском. Коэффициенты вариации брома в накипи питьевых вод составляют меньше 100% для таких районов области как Александровский, Чаинский, Молчановский, Кривошеинский, Шегарский, Кожевниковский и Бакчарский. В Колпашевском, Асиновском, Первомайском, Верхнекетском и Тегульдетском районах коэффициенты вариации не превышают 135%, тогда как в Томском и Зырянском районах они составляют 144% и 388% соответственно, указывая на крайне неоднородный характер распределения элемента в накипи данных районов, особенно последнего. Такая высокая вариативность содержаний брома в накипи питьевых вод разных районов области может быть связана как со сложными природными условиями формирования подземных вод, так и влиянием антропогенной деятельности.

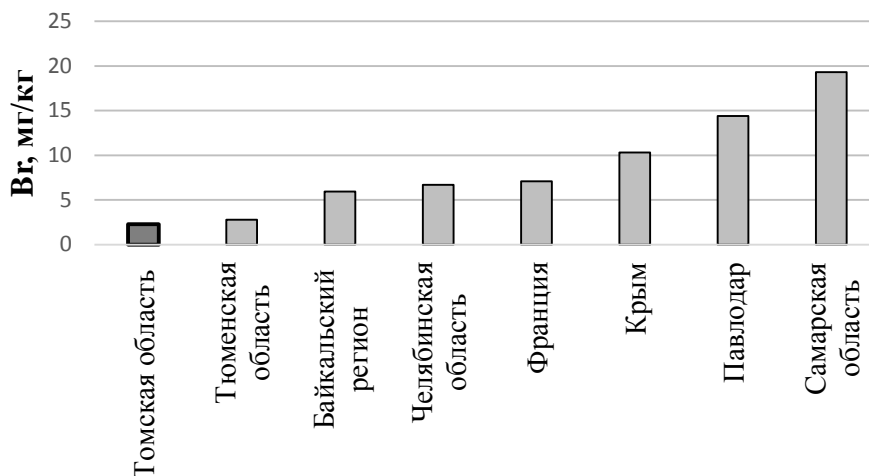
**Таблица 6.4** – Статистические параметры распределения содержаний брома в накипи питьевых вод районов Томской области, мг/кг

Район	N	X	$\lambda$	Min	Max	Mo	Me	V, %
Александровский	2	0,9	0,5	0,4	1,4	–	0,9	79
Каргасокский	2	0,3	–	0,3	0,3	0,3	0,3	–
Парабельский	6	0,5	–	0,5	0,5	0,5	0,5	–
Колпашевский	15	1,4	0,4	0,5	4,6	0,5	0,5	103
Чаинский	8	1,4	0,5	0,3	3,1	0,3	1,1	91
Молчановский	7	3,3	0,4	1,5	4,8	–	3,1	34
Кривошеинский	4	2,3	0,2	1,9	2,8	–	2,3	16
Шегарский	3	2,4	0,6	1,4	3,3	–	2,5	40
Кожевниковский	5	2	0,9	0,3	5	0,3	2,1	98
Томский	83	3,8	0,6	0,2	47,7	0,5	2,8	144
Асиновский	7	1,2	0,6	0,3	3,7	0,3	0,3	121
Первомайский	12	1,8	0,6	0,3	5,7	0,3	0,8	107
Верхнекетский	7	0,7	0,3	0,3	2,4	0,5	0,5	101
Тегульдетский	20	1,3	0,3	0,3	8,9	0,3	0,3	134
Зырянский	88	0,8	0,1	0,1	57,3	0,1	0,7	388
Бакчарский	37	1,8	0,2	0,1	5,4	0,9	1,2	76
Томская область	306	2,3	0,3	0,1	57,3	0,5	1,2	200

Примечание: X – среднее значение;  $\lambda$  – стандартная ошибка; Min и Max – минимальное и максимальное значения соответственно, Mo – мода, Me – медиана, V – коэффициент вариации, N – количество проб.

Как показывает сравнительный анализ уровней накопления брома в накипи питьевых вод Томской области и других регионов России и зарубежья (рисунок 6.8), содержания брома в

накипи питьевых вод Томской области являются одними из минимальным, наряду с рассматриваемой накипью Тюменской области.



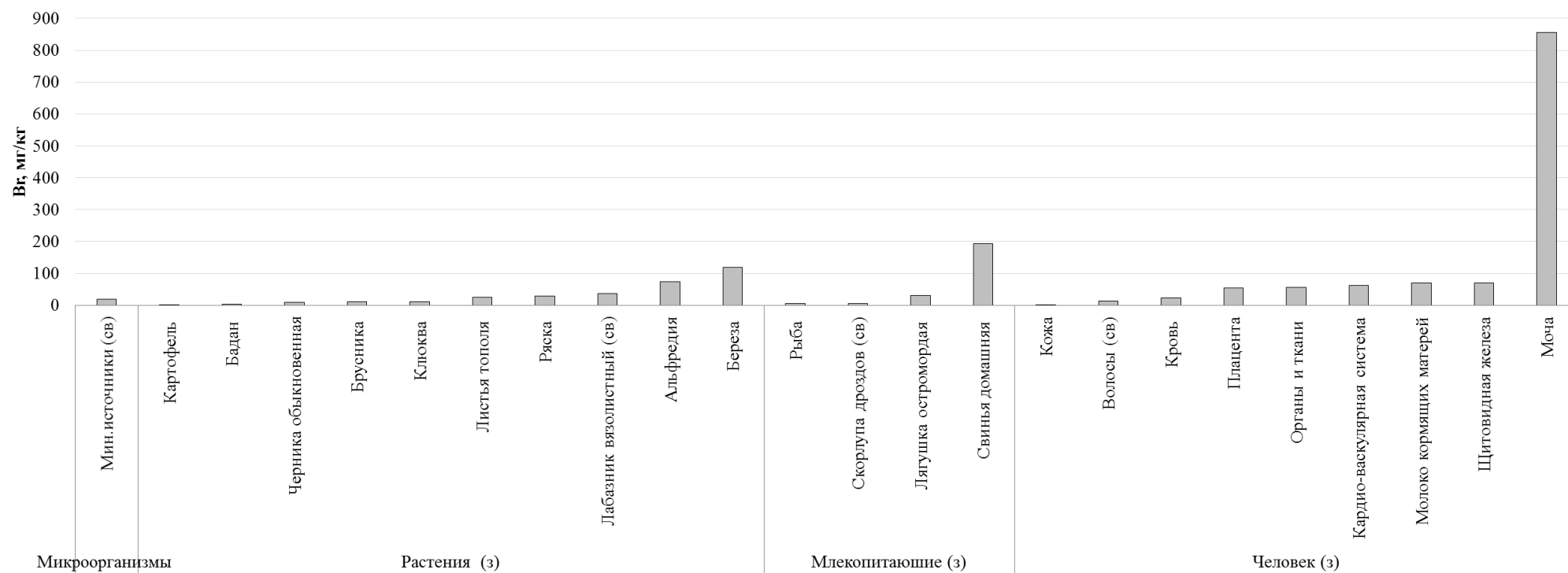
**Рисунок 6.8** – Содержания брома в накипи питьевых вод (мг/кг) Томской области и других регионов России и зарубежья

На наш взгляд, это обусловлено абсолютно различными гидрогеологическими условиями территорий, в то время как находящиеся на границе друг с другом Томская и Тюменская области находятся в пределах Западно–Сибирской равнины и для них характерны схожие гидрогеологические комплексы (*Геологическое строение ...*, 1999).

Таким образом, с особой осторожностью стоит подходить к изучению брома в накипи питьевых вод ввиду возможного испарительного барьера, имеющего место в бытовых условиях и способствующего аккумуляции элемента. Распределение брома в накипи питьевых вод Томской области является неоднородным. Наименьшие содержания элемента в данном объекте исследования отмечаются в Каргасокском районе области, а наибольшие – в Томском. При этом сравнительный анализ демонстрирует, что содержания брома в накипи питьевых вод Томской области значительно ниже его содержаний в данном объекте исследования других территорий России и зарубежья.

### **6.2 Особенности накопления и распределения брома в биотических компонентах**

Анализ фактического материала (рисунок 6.9) показывает, что живое вещество способно активно концентрировать бром, а его содержания в нем могут варьировать в очень широких пределах. Стоит отметить, что разнонаправленные геохимические реакции, характерные для живого вещества и имеющие место в аэробных и анаэробных обстановках, нередко происходящих при участии микроорганизмов, определяют многообразие несовместимых форм нахождения элементов (*Ярошевский, 2004*).



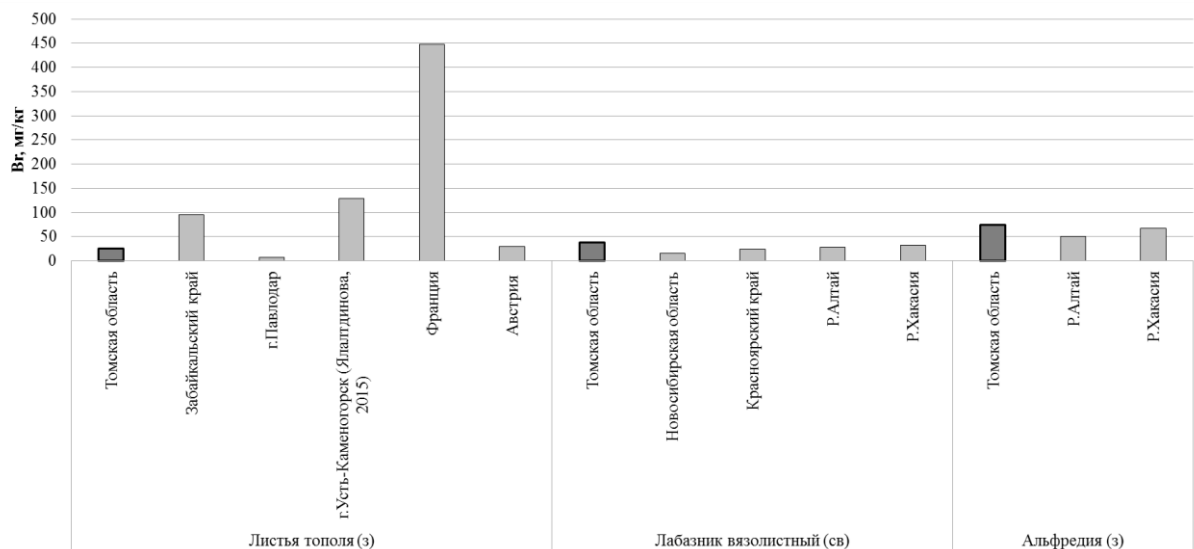
**Рисунок 6.9** – Средние содержания брома в живых организмах Томской области (мг/кг сухого вещества – св или золы - з)

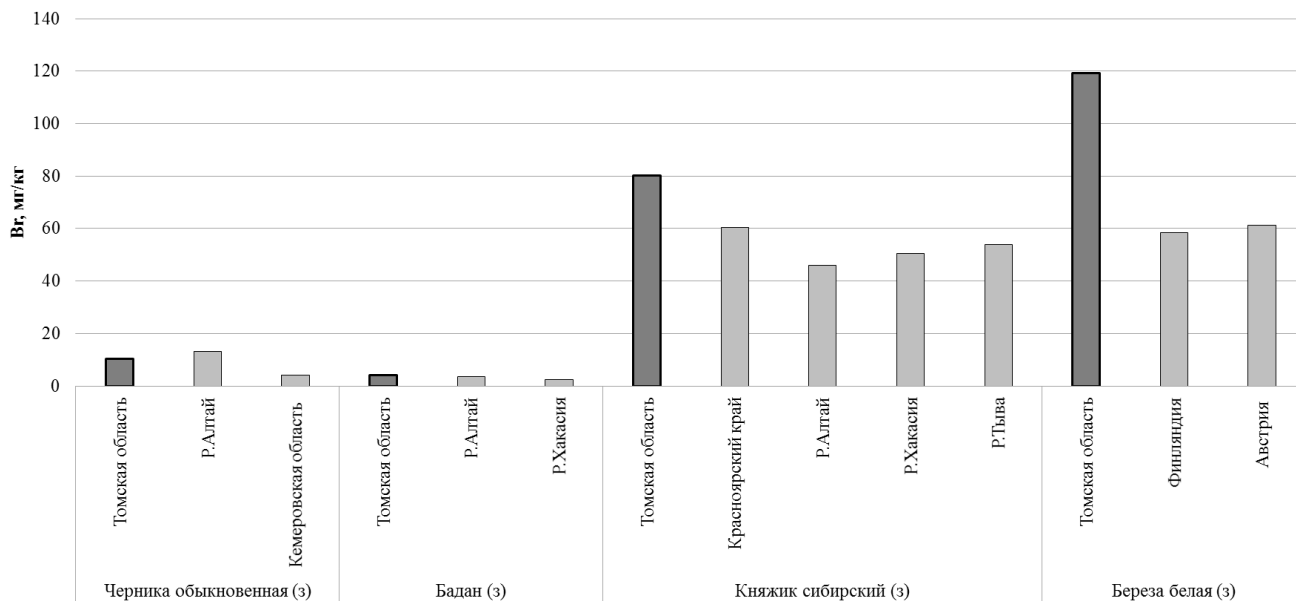
### Микроорганизмы минеральных источников

Микроорганизмы минеральных источников (маты) – биоценозы, состоящие из прокариот и располагающиеся на дне водоемов или в их прибрежной зоне, по форме наиболее похожи на плёнки плесени. Мат является высоко интегрированным сообществом с чрезвычайно сложно организованной трофической структурой. Он состоит из продуцентов и консументов первого порядка, а также редуцентов, получающих органику из верхних слоев по детритной цепи. Исследования показывают, что мат является одной из самых сбалансированных экосистем: он производит ровно столько органики и кислорода, сколько тут же расходует в процессе своей жизнедеятельности (Перминова, 2012, 2013). По результатам сравнительного анализа можно заключить, что уровни накопления брома в матах Томской области выше, чем в матах Байкальского региона, средние содержания элемента в которых составляют 18,3 и 8,5 мг/кг, соответственно.

### Растения

Очень широкое распространение получило изучение химического состава растений, как фундаментальная база для познания биогеохимических циклов в экосистемах и ландшафтах, а также при поисках полезных ископаемых. Связано это с тем фактом, что растения являются одними из наиболее чувствительных компонентов, отражающих как воздушное, так и почвенное загрязнение (Кабата-Пендиас, 1989; Kabata – Pendias, 2011). Отмечается, например, что листья тополей, произрастающие в городах, содержат в 26—60 раз больше брома, чем листья с деревьев пригорода (Филов, 1989). Особенно актуальным является изучение лекарственных растений, для которых Л.С. Селиванов отмечал бромную специфику. Кроме того, Н.В. Барановской (2011) было показано, что бром переходит из сухой части растения в фармакологически активный экстракт. Результаты сравнительного анализа уровней накопления брома в растительных видах Томской области и других территорий представлены на рисунке 6.10.



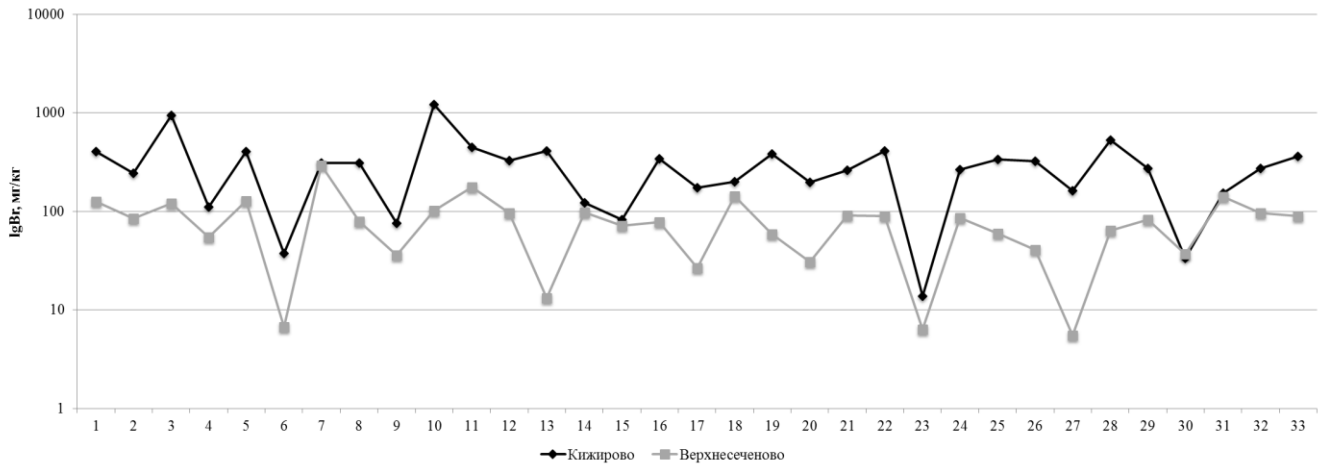


**Рисунок 6.10** – Содержания брома в растительных организмах Томской области и других регионов России и зарубежья (мг/кг сухого вещества или золы)

Как видно, уровни накопления брома в листьях тополя черного (*Populus nigra* L.) Томской области значительно ниже, чем таковые практически на всех рассматриваемых территориях, за исключением тополей г. Павлодар. Аномально высокие содержания элемента отмечаются в листьях тополя, отобранных во Франции вблизи нефтехимического предприятия. Уровни концентрирования брома в лабазнике вязолистном, альфредии, чернике обыкновенной и бадане различных территорий характеризуются относительно близкими значениями. Повышенные содержания брома в Томской области, по сравнению с другими территориями, отмечаются также в княжике сибирском и березе белой.

#### **Закономерности накопления и распределения брома в животных организмах**

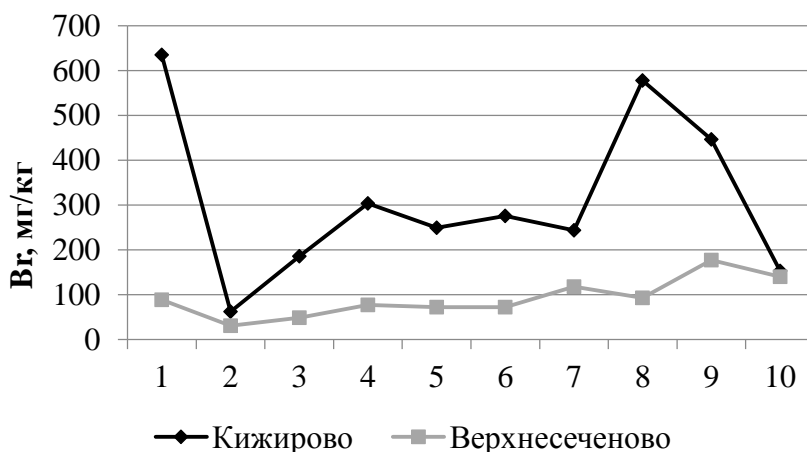
Животные организмы являются не менее чувствительными к изменениям, происходящим в окружающей среде, чем растения, однако, они отражают более комплексное поступление элементов, так как являются последующим после растений звеном пищевой цепи. Анализ содержаний брома в золе органов и тканей домашней свиньи (рисунок 6.11) показывает, что концентрации элемента в двух организмах, проживающих на разных территориях, могут значительно варьировать. Но даже несмотря на данные отличия, отмечаются общие тенденции в накоплении элемента.



**Рисунок 6.11** – Уровни накопления брома в золе органов и тканей свиньи домашней (мг/кг) двух населенных пунктов Томского района

Примечание: 1 – бронхи, 2 – внутренний жир, 3 – глаз, 4 – головной мозг, 5 – желудок, 6 – зубы, 7 – кожа, 8 – копыта, 9 – кровь, 10 – легкие, 11 – матка, 12 – молочная железа, 13 – мочевого пузыря, 14 – мышечная ткань, 15 – печень, 16 – пищевод, 17 – позвонок, 18 – почка, 19 – прямая кишка, 20 – ребра, 21 – селезенка, 22 – сердце, 23 – спинной мозг, 24 – толстый кишечник, 25 – тонкий кишечник, 26 – трахея и кадык, 27 – трубчатая кость, 28 – ухо, 29 – хвост, 30 – щетина, 31 – щитовидная железа, 32 – язык, 33 – двенадцатиперстная кишка.

При этом, характер концентрирования галогена в каждой из систем организмов двух поросят также имеет несколько отличий (рисунок 6.12). Максимальные концентрации брома отмечаются в дыхательной и сенсорной системах. Примечательно, что в независимости от места отбора поросят, отмечаются идентичные уровни накопления элемента в нервной и эндокринной системах.



**Рисунок 6.12** – Уровни накопления брома в системах органов свиньи домашней (мг/кг зола)

Примечание: 1 – дыхательная, 2 – нервная, 3 – опорно-двигательная, 4 – выделительная, 5 – кровеносная и лимфатическая, 6 – пищеварительная, 7 – покровная, 8 – сенсорная, 9 – половая, 10 – эндокринная системы.



Низкие концентрации брома в нервной системе могут свидетельствовать о наличии барьера, препятствующего проникновению элемента. Однако, довольно трудно судить об эндокринной системе без анализа других элементов подгруппы галогенов, как минимума, йода, так как в данной системе бром выступает его активным конкурентом.

Таким образом, содержания брома в растениях и животных могут варьировать в широких пределах. В растениях Томской области отмечаются повышенные содержания брома (относительно других территорий) в княжике сибирском и березе белой. Низкие концентрации элемента в нервной системе свиньи домашней могут указывать на наличие серьезного биогеохимического барьера.

### **Особенности накопления и распределения брома в организме человека**

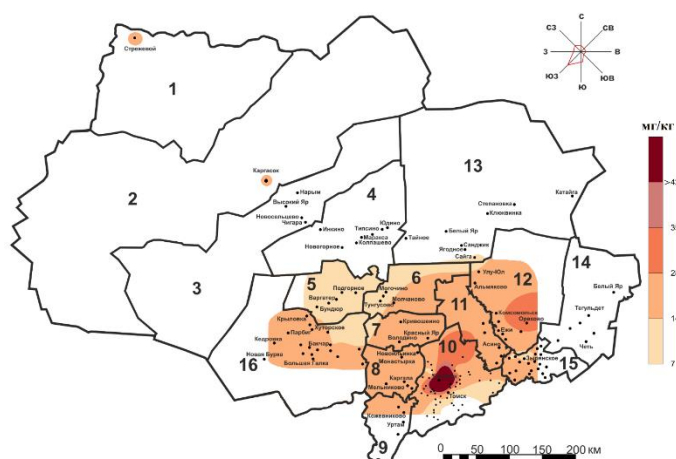
Организм человека является очень сложной системой и представляет из себя конечное звено биогеохимической пищевой цепи, который можно рассматривать в качестве геоиндикатора, интегрирующего в себе трансформацию природной среды (Игнатова, 2010).

Уровни накопления брома в крови жителей Томской области значительно различаются в различных районах области (таблица 6.5). При этом, основным ядром ореола, т.е. населённым пунктом, в котором отмечается абсолютный максимум содержания элемента является г. Северск. В Томском районе области просматривается закономерность, заключающаяся в наличии пространственного ореола с хорошо выраженной северо-восточной ориентировкой (рисунок 6.13).

**Таблица 6.5 – Статистические параметры распределения содержаний брома в крови жителей районов Томской области, мг/кг**

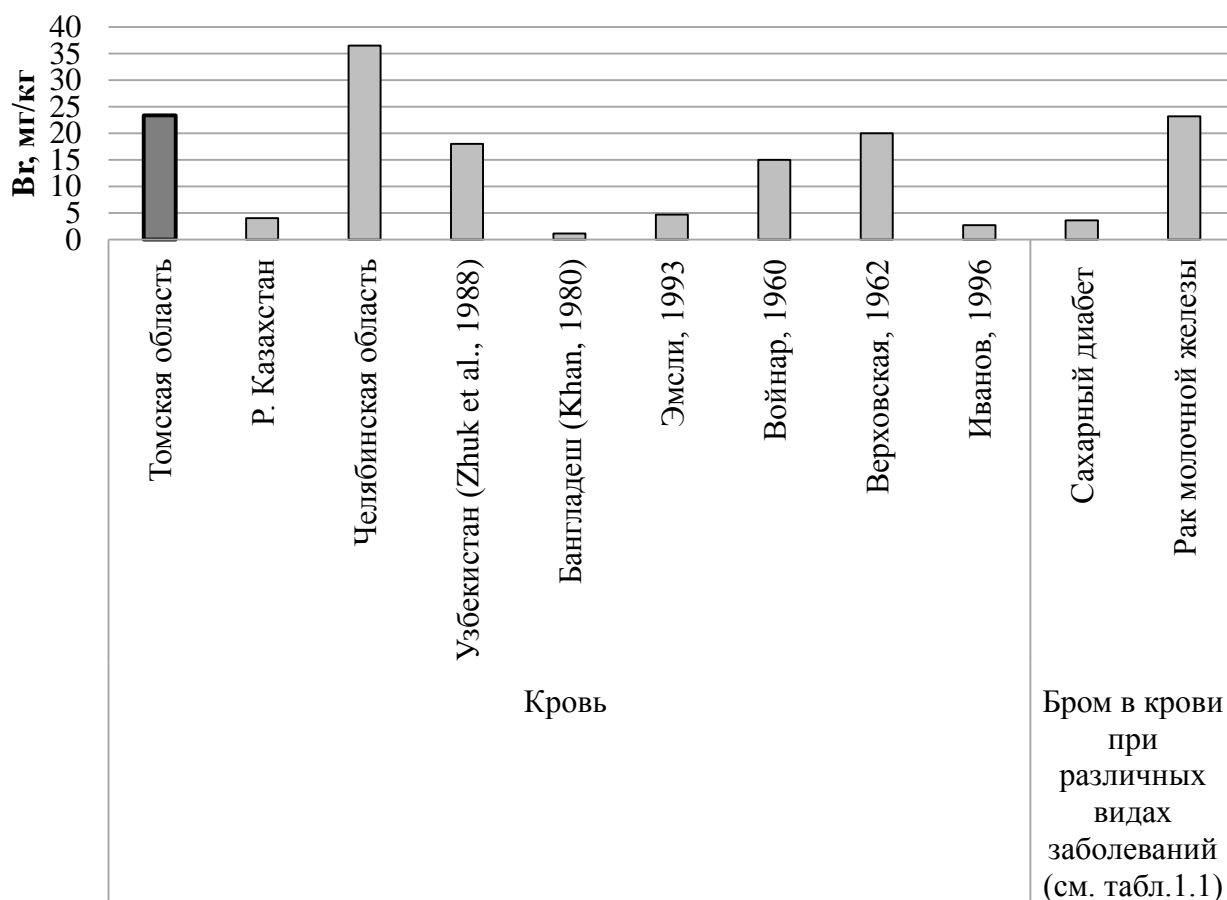
Район	N	X	$\lambda$	Min	Max	Mo	Me	V,%
Александровский	5	19,7	2	13,8	25,4	–	20,2	22
Каргасокский	4	22,9	3,4	14,6	30,9	–	23	–
Чаинский	1	8,4	–	8,4	8,4	–	8,4	–
Шегарский	6	20,4	2,4	13,3	28,5	–	18,6	29
Кожевниковский	3	14,7	2,7	10,7	19,8	–	13,6	32
Томский	133	30	4	4,2	434	12	21	153
Первомайский	3	27,2	4,5	19,2	34,7	–	27,6	29
Верхнекетский	3	10,2	0,9	8,6	11,8	–	10,3	16
Зырянский	62	12,4	0,5	6,2	24,1	8,3	11,5	33
Бакчарский	35	20,5	0,9	11,8	34,6	15,9	19,9	27
Томская область	255	23,4	2,1	4,2	434	12	16,5	146

Примечание: X – среднее значение;  $\lambda$  – стандартная ошибка; Min и Max – минимальное и максимальное значения соответственно, Mo – мода, Me – медиана, V – коэффициент вариации, N – количество проб.



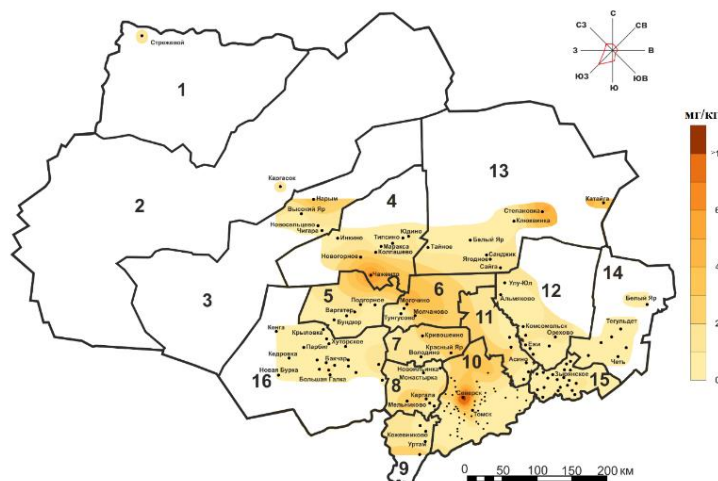
**Рисунок 6.13** – Схематическая карта распределения брома (мг/кг) в крови жителей Томской области

Сравнение полученных нами результатов по уровню накопления брома в крови жителей Томской области с данными по другим регионам, а также литературными данными, представлено на рисунке 6.14. Содержания брома в крови жителей Томской области превышают таковые по имеющимся литературным данным и результатам исследований, проведенным в республике Казахстан, однако они являются более низкими, чем концентрации галогена, наблюдаемые в крови жителей Челябинской области.



**Рисунок 6.14** – Содержания брома в крови жителей Томской области и других регионов России и зарубежья (мг/кг сухого вещества или золы)

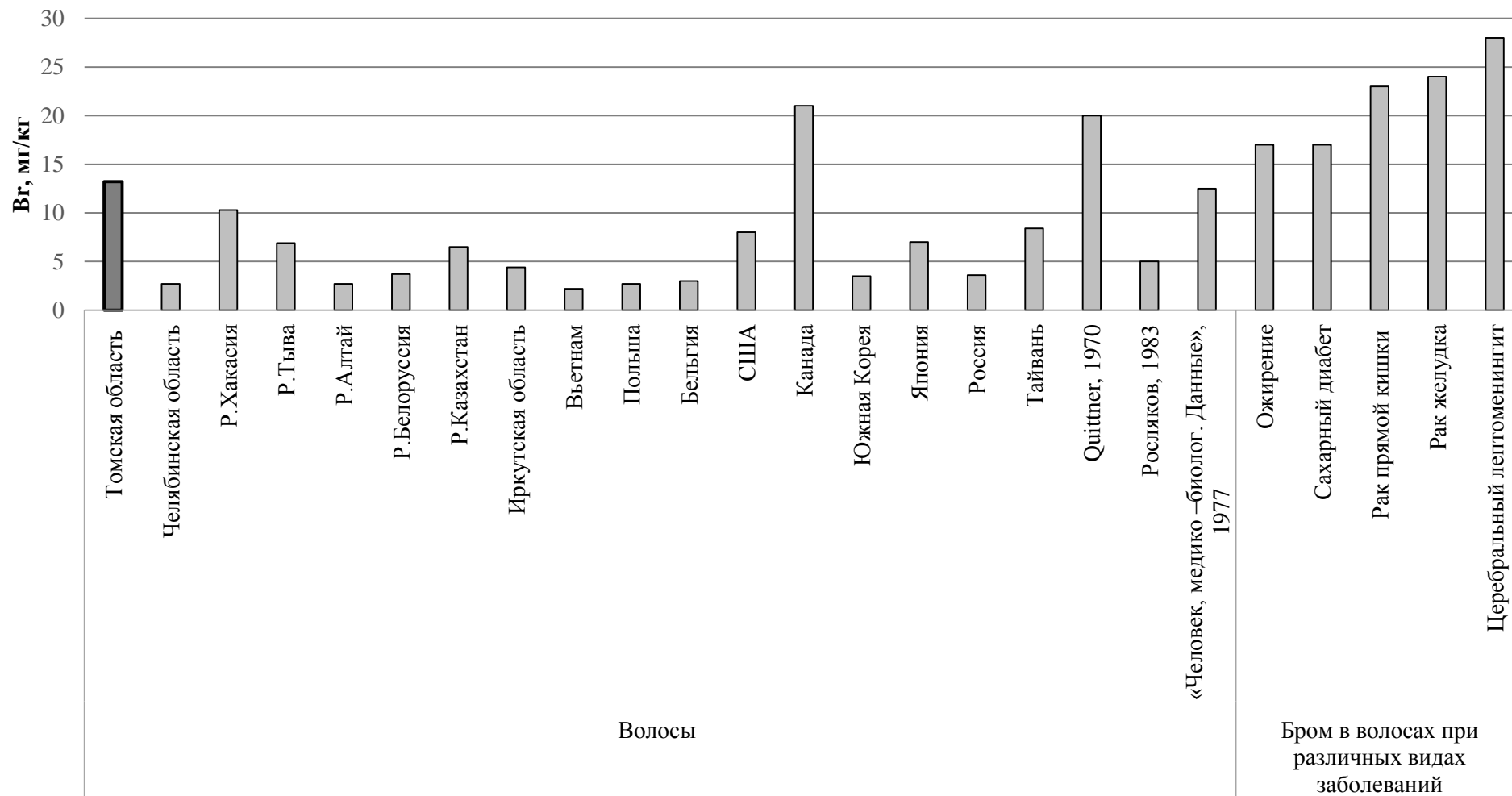
Особенности пространственного распределения брома в волосах детей Томской области (рисунок 6.15) являются несколько схожими с таковыми в крови жителей, что может указывать на идентичный путь поступления элемента. Так как бром является высоко летучим элементом (Эмсли, 1991; Гринвуд, Эршино, 2008), он очень быстро способен проникает через дыхательные пути и кожные покровы в кровь и волосы. Мы предполагаем, что идентичные особенности распределения брома в данных биосубстратах указывают на преимущественное аэрозольное поступление элемента. Об этом также можно судить по повышенным уровням его накопления в органах дыхательной системы жителей Томского района области (Барановская и др., 2016).



**Рисунок 6.15** – Схематическая карта распределения брома (мг/кг) в волосах детей Томской области

В волосах отмечается и другое однородное геохимическое поле распространения элемента, при отсутствии колебаний его содержаний, фиксирующееся в биосубстрате жителей, проживающих вверх по течению реки Оби и не выходящее за пределы Колпашевского района области. Это указывает, во-первых, на полифакторность путей поступления галогена в волосы, который может быть обусловлен как экзогенными, так и эндогенными путями. Под первым подразумевается трансграничный перенос по долине реки, который, по-видимому, происходит в результате деятельности предприятий СПЗ, располагающихся вдоль реки Томь, которая, в свою очередь, впадает в р.Обь. Эндогенные пути отражают особенности питания населения, например, поступление элемента с водой, а также по трофическим цепям в результате употребления в пищу местной речной рыбы и др. (Барановская, 2003). В данном случае можно говорить о неразрывной связи первых и вторых, и непосредственном влиянии экзогенных факторов на эндогенные. Во-вторых, можно заключить о том, что химический состав волос более ярко демонстрирует изменения, происходящие в окружающей среде под воздействием природно-техногенных факторов, чем кровь. Данный факт в свое время также был отмечен Н.В. Барановской (2003).

Уровни накопления элемента в волосах детей Томской области (рисунок 6.16) превышают данные практически по всем изучаемым нами регионам России и зарубежья, за исключением Канады (указаны максимальные значения).

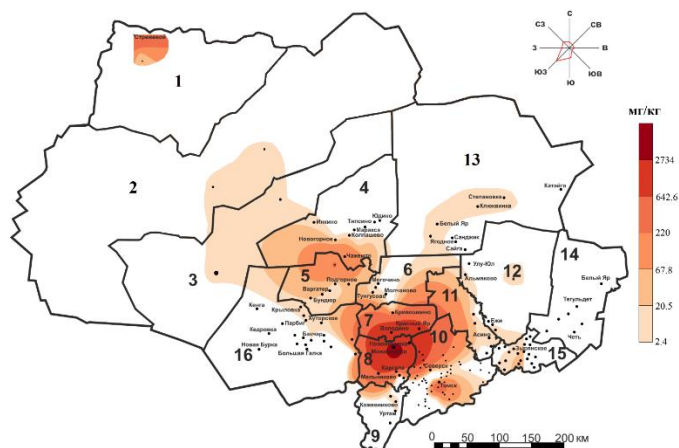


**Рисунок 6.16** – Содержания брома в волосах жителей Томской области и других регионов России и зарубежья, мг/кг

Примечание: для сравнительной характеристики использовались данные таблиц 1.1 и 2.6.

Стоит отметить, что содержания брома в волосах детей области намного больше, чем в волосах детей, проживающих в таких странах, как Вьетнам, США, Япония и ряде других, расположенных в непосредственной близости к морю, что абсолютно не характерно для Томской области. Однако, уровни накопления брома в волосах детей области намного меньше его содержаний в волосах больных людей, страдающих раком желудка, прямой кишки, сахарным диабетом и т.д. Мы предполагаем, что высокие уровни концентрирования брома в волосах могут указывать на наличие определенных видов заболеваний, о чем нельзя судить по содержаниям элемента в крови.

Что касается характера распределения брома в патологически измененной щитовидной железе, полученная картографическая информация показывает, что ореолы повышенных содержаний элемента фиксируются сразу в нескольких районах области: Александровском, Колпашевском, Чаинском, Шегарском и Томском (рисунок 6.17). Вообще стоит отметить, что патология щитовидной железы у населения области требует особого внимания. Весьма важным аспектом в ее формировании может являться именно бром, что уже детально рассматривалось нами в данной работе. Чрезвычайно актуальным этот вопрос является в Томской области, которая, согласно *О.А. Денисовой и др. (2011)* является биогеохимической провинцией с дефицитом йода. Примечательно, что наблюдается схожая тенденция в пространственном распределении элемента в щитовидной железе и волосах, заключающаяся в повышенных концентрациях галогена в биосубстратах жителей г. Чажемто Колпашевского района области, что по нашему мнению, может объясняться присутствием аномалии природного типа, обусловленной наличием в данном населенном пункте йод-бромных минерализованных вод. Необходимо подчеркнуть, что гидрогеологические условия Колпашевской свиты характеризуются рядом специфичных особенностей: здесь отмечаются залежи холодных вод олигоцен-четвертичного и эоцен-верхнемелового комплексов, теплых вод апт-альб-сеноманского водоносного комплекса, горячих вод готерив-барремского водоносного горизонта, очень горячих вод валанжнского водоносного комплекса, а также очень горячих и перегретых вод валанжин-верхнеюрского, нижне-верхнеюрского и палеозойского водоносных комплексов (*Мищенко М.В., 2007*).



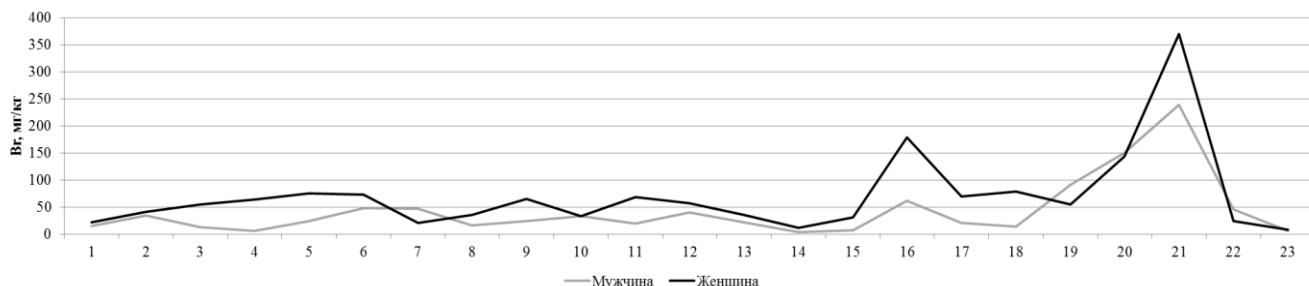
вод валанжин-верхнеюрского, нижне-верхнеюрского и палеозойского водоносных комплексов (*Мищенко М.В., 2007*).

**Рисунок 6.17** – Схематическая карта распределения брома (мг/кг) в патологически измененной щитовидной железе жителей Томской области

Аномально высокие уровни накопления брома в данном биоматериале отмечаются также у жителей Александровского района области, что не находит отражение в других изучаемых объектах окружающей среды. В отличие от Александровского района, в Шегарском районе области, где фиксируются аномально высокие концентрации брома в щитовидной железе жителей, повышенные содержания элемента отмечаются также в почвах, накипи питьевых вод и в волосах жителей района. И первый и второй факт требуют дополнительных исследований.

Как показывает анализ фактического материала, в органах и тканях женского организма концентрации брома выше, чем в мужском (рисунок 6.18), что противоречит литературным данным (Верховская, 1962). Однако, в бронхах и легких концентрации брома в мужском организме превышают таковые, наблюдаемые в женском. Это можно объяснить физиологическими особенностями, так как в среднем, объем легких у женщин меньше, чем у мужчин. Наибольшие содержания брома обнаруживаются в аорте двух организмов. В целом же можно отметить прослеживание общих тенденций в накоплении брома в органах и тканях мужского и женского организмов, проживающих на территории Томской области. Больше всего брома наблюдается в системе крово- и лимфообращения, меньше всего – в нервной системе двух организмов. При любом способе поступления элемента в организм человека (ингаляционный, пероральный или кожный) он быстро распределяется, но надолго задерживается в крови, именно поэтому в системе крово- и лимфообращения зафиксирована его максимальная концентрация.

Особое внимание стоит обратить на низкие концентрации брома в нервной системе человека. Данная особенность уже была зафиксирована нами для свиньи домашней. Таким образом, данная информация несет чрезвычайно важное значение, ведь вопрос о роли брома в эволюции нервной системы живых организмов был положен еще *А.И. Перельманом (1979)*. Полученные нами данные указывают на наличие серьезного биогеохимического барьера в нервной системе живых организмов, препятствующего проникновению элемента, несмотря на его хорошую миграционную способность, отмечаемую для природных сред.

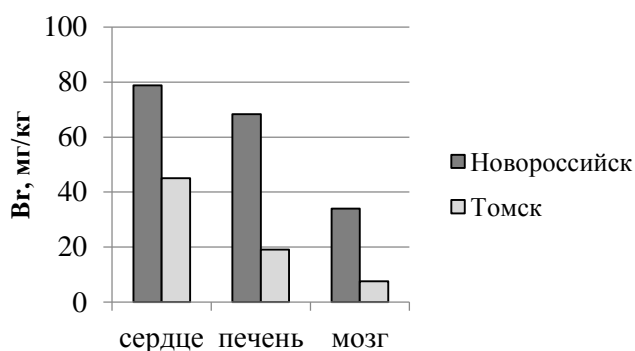


**Рисунок 6.18** – Средние содержание брома в зольном остатке мужского и женского организмов (мг/кг), проживающих в Томской области

Примечание: 1 – щитовидная железа, 2 – тонкий кишечник, 3 – язык, 4 – поджелудочная железа, 5 – желудок, 6 – мочевой пузырь, 7 – бронхи, 8 – кожа, 9 – 12 – перстная кишка, 10 –

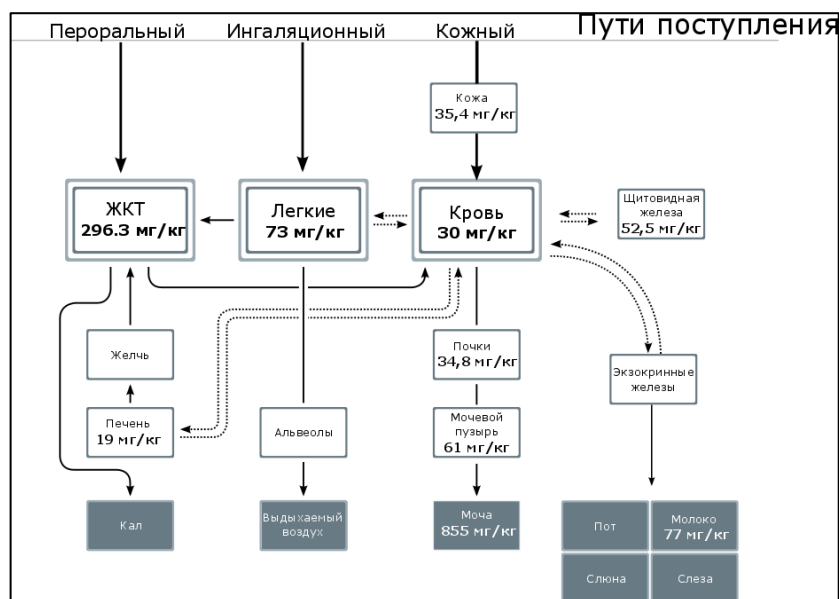
селезенка, 11 – толстый кишечник, 12 – трахея, 13 – мускулатура, 14 – головной мозг, 15 – печень, 16 – пищевод, 17 – сердце, 18 – жировая ткань, 19 – легкие, 20 – полая вена, 21 – аорта, 22 – почка, 23 – ногти.

Сравнение зольного остатка жителей Томского района и г. Новороссийска (рисунок 6.19) показывает, что в органах жителей южного города содержание брома намного выше. Это объясняется географическим положением города и его близостью к морю. Помимо поступления брома из атмосферного воздуха этого «морского города», жители также потребляют в пищу большое количество морепродуктов, являющихся высокими концентраторами элемента и вносящих большой вклад в его накопление в организме.



**Рисунок 6.19** – Средние содержание брома в зольном остатке мужского и женского организма (мг/кг)

Данные, полученные нами по содержанию брома в организме человека, а также знание общих кинетических особенностей элемента, позволили построить упрощенную схему механизмов поступления, накопления и распределения элемента в организме (рисунок 6.20). За основу данных по содержанию брома в организме человека были приняты средние содержания в организме жителей Томского района Томской области (мг/кг).



**Рисунок 6.20** – Упрощенная схема-рисунок поступления, накопления и распределения брома в организме человека (мг/кг) на примере жителей Томской области

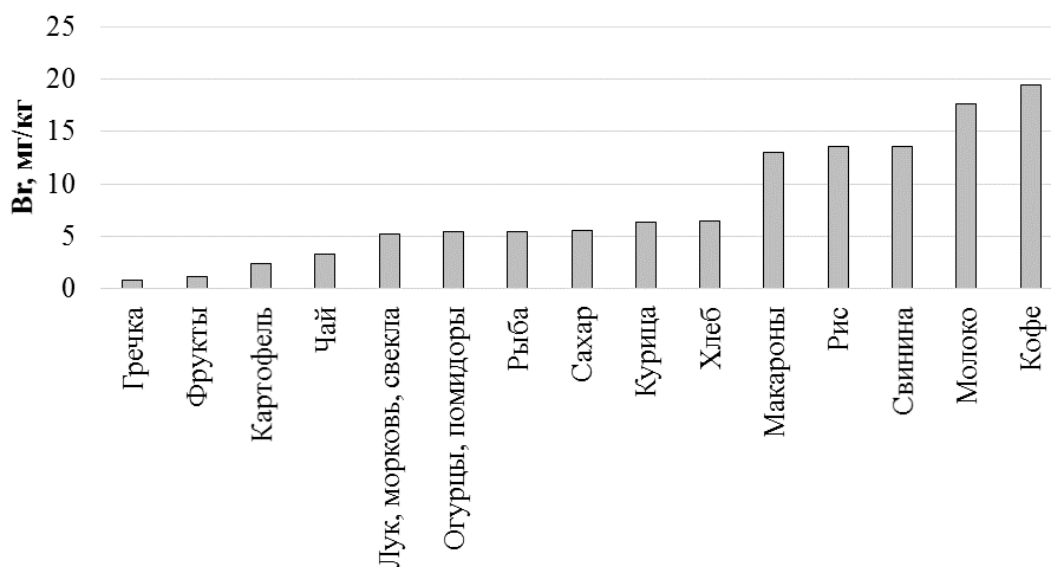
Стоит отметить, что кинетические и динамические особенности брома изучены крайне слабо, так как элемент является химически активным в биологических системах, что затрудняет его отделение от соединений, которые он образует при взаимодействии с влажной поверхностью слизистых оболочек, с тканями дыхательных путей, а также желудочно-кишечным трактом. В живой ткани бром быстро переходит в бромид и в такой форме остаётся в тканях (*Верховская, 1962*). Большая часть брома поступает в организм пероральным путем, к тому же, элемент является постоянной составной частью нормального желудочного сока. Бром, поступивший в желудочно-кишечный тракт кровью направляется в печень, которая является основным органом разрушения сложных органических соединений брома. Из печени вместе с желчью он выводится через кишечник, при этом часть элемента может повторно всасываться в кровь и выделяться с мочой. Другим способом попадания брома в организм может быть ингаляционный. Так как бром является высоко летучим элементом, он быстро проникает в дыхательные пути, а затем в кровь. Часть брома со слюной может попадать в желудок, тогда как другая часть выводится из организма выдыханием. Третьим способом проникновения элемента в организм является кожный, особенно чувствительными являются повреждённые кожные ткани. Проникший через кожный покров бром сразу же проникает в кровь. Однако, при любом типе поступления брома в организм, его распределение проходит быстро, а затем он надолго задерживается в крови, что указывает на то, что элемент практически не включен в обмен между органами и тканями. Выделение брома осуществляется, главным образом, с мочой, но небольшое количество элемента может также элиминироваться с калом, потом, слюной, молоком и слезами.

Так как большая часть брома поступает в организм пероральным путем, т.е. с пищей и питьем (*Верховская, 1962*), исследование пищевых продуктов, потребляемых жителями области имеет крайне важное значение. Кроме того, анализ эколого-геохимической ситуации не может считаться полным без изучения данных о питании и химическом составе продуктов, употребляемых населением в пищу (*Покатилов Ю.Г., 1992*). Продукты питания являются одним из важнейших факторов нормального функционирования и жизнедеятельности живых организмов, обеспечивая их необходимыми веществами и элементами. Так как основным путем поступления химических элементов в организм человека является именно пероральный способ (от 80 до 95% с продуктами питания, 4,7% - с водой), в основном, с растительной и животной пищей в результате ее прохождения по пищевым цепям, то некоторые элементы могут быть тесно связаны со здоровьем человека, вызывая физиологические или метаболические изменения. Еще Гиппократ отмечал эту взаимосвязь, говоря: «Скажи мне что ты ешь, и я скажу, чем ты болеешь». В нашей стране, огромный вклад в изучение роли химических элементов для живых организмов внесли Войнар А. О., Габович Р.Д., Коломийцева М.Г., Ноздрюхина Л.Р., Пейве Я.В., Хакимова А.М. и др.



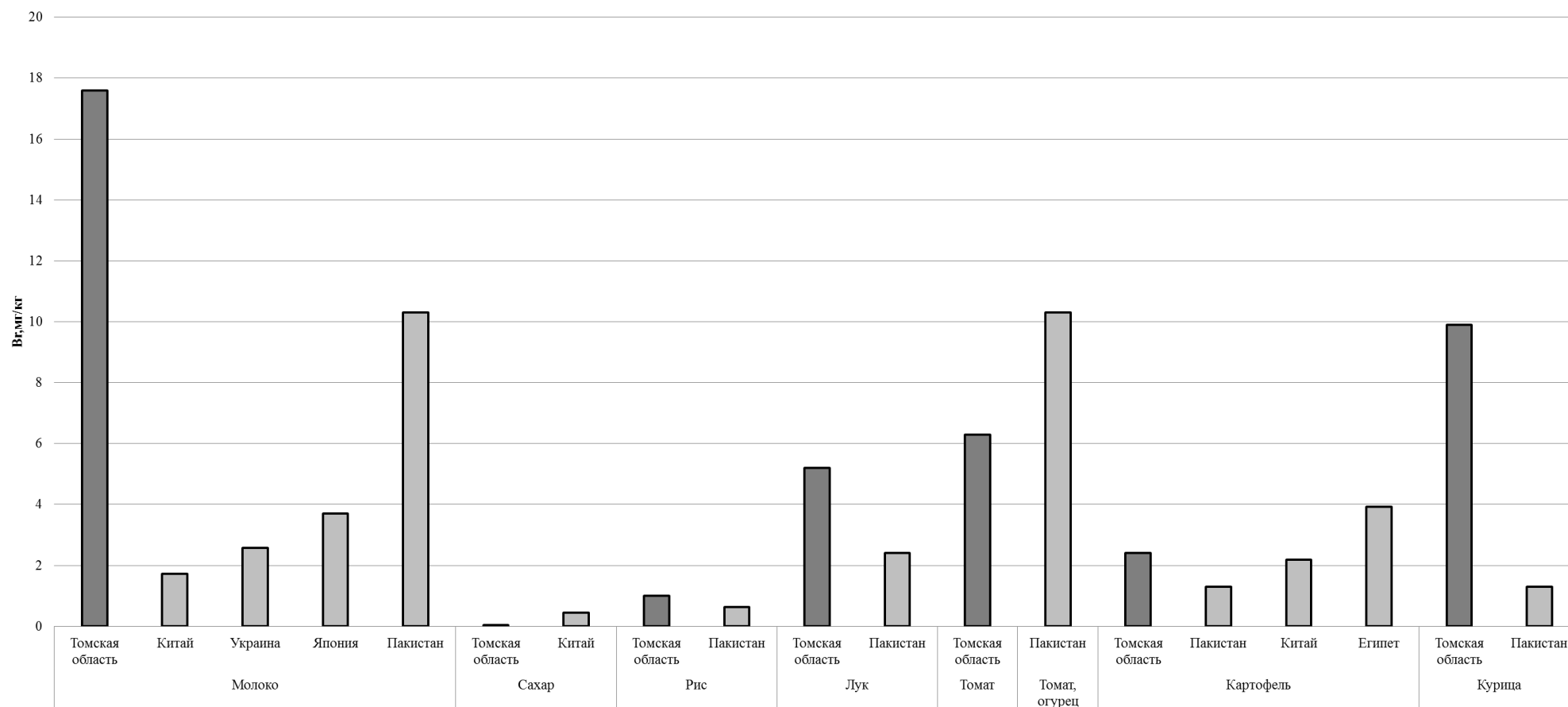
К сожалению, на сегодняшний день микроэлементный состав пищевых продуктов изучен крайне слабо. Исследования, в общем по Российской Федерации, и, в частности по Сибири, ориентированы, в основном, на изучение тяжелых металлов (в первую очередь ртути, кадмия, свинца, мышьяка, цинка, меди, олова и железа, которые в соответствии с международными требованиями ФАО/ВОЗ были отмечены как приоритетные), йода (в связи с наблюдающимся во многих регионах России недостатком элемента) и радионуклидов (Богачев, 2001; Дрюцкая, 2005; Шитова, 2005; Захарова, 2006 и др.). Однако данные по остальным эссенциальным элементам, в том числе по бромю, практически отсутствуют. Таким образом, нами впервые был осуществлен комплексный анализ продуктов питания, потребляемых в пищу жителями Томской области.

Как было показано в обзорной главе, содержания брома в продуктах различных регионов мира варьируют в широких пределах (таблица 2.8), а, следовательно, значительно различается и ежедневное его потребление жителями разных стран (таблица 2.7). Изученные нами продукты питания Томской области (рисунок 6.21) демонстрируют, что наибольшие уровни накопления брома отмечаются по убыванию: в кофе, молоке, свинине, рисе, макаронах, а наименьшее содержание элемента отмечается в гречневой крупе.



**Рисунок 6.21**– Содержания брома в пищевых продуктах (мг/кг сухого продукта)

При этом сравнительный анализ содержаний брома в продуктах питания, употребляемых в пищу жителями Томской области и жителями других стран (рисунок 6.22) демонстрирует, что по сравнению с другими регионами, отмечаются максимальные содержания брома в молоке, рисе, луке и курице, отобранных в Томской области.

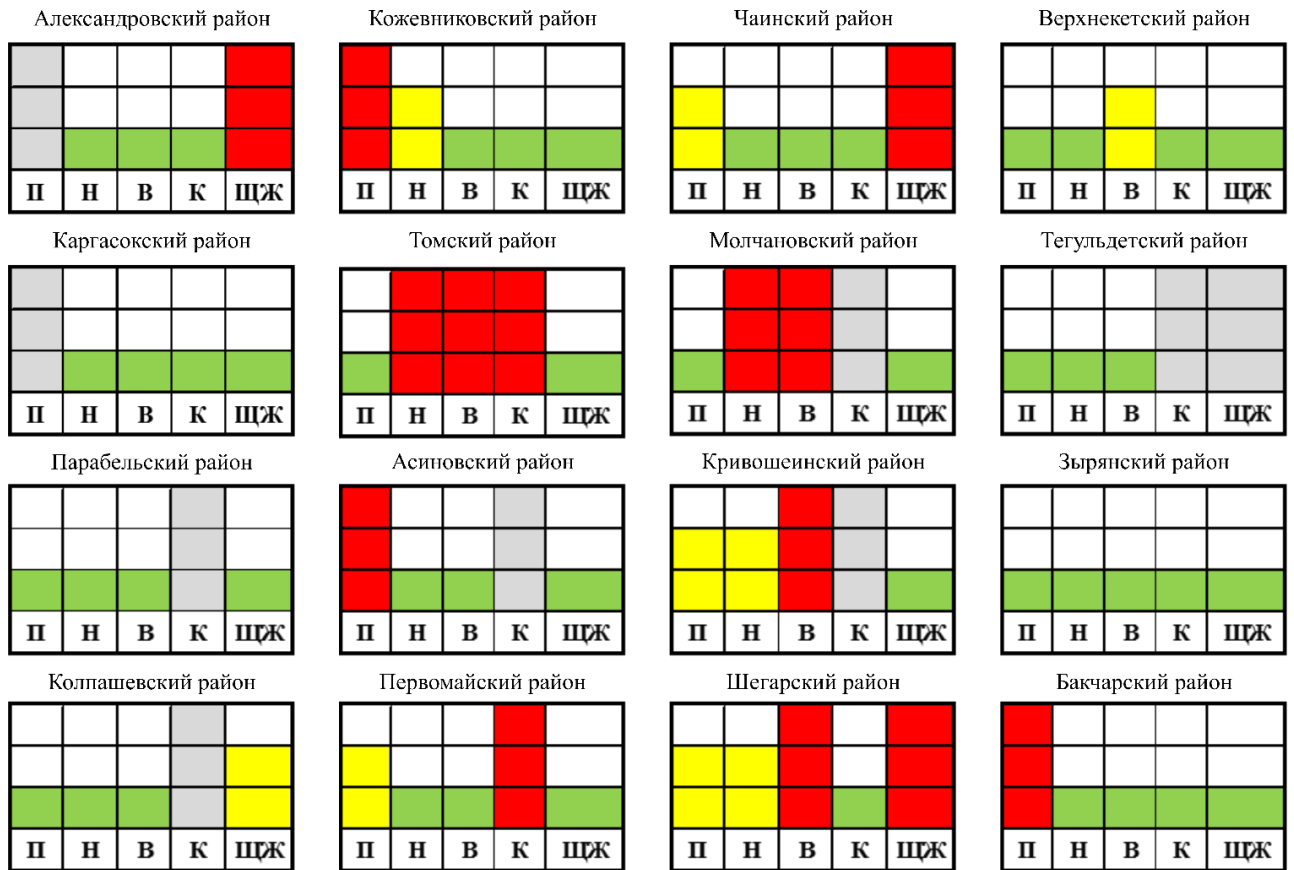


**Рисунок 6.22** – Сравнительный анализ содержаний брома в продуктах питания (мг/кг сухого продукта), употребляемых в пищу жителями Томской области и жителями других стран (для сравнительного анализа использовались данные таблицы 2.8).

*Таким образом, распределение брома в крови, волосах детей и патологически измененной щитовидной железе жителей Томской области является крайне неравномерным. Анализ фактического материала, отобранного на различных территориях наряду с литературными данными, указывают на достаточно высокие уровни накопления элемента в биосубстратах жителей Томской области. В организме человека, как и в организме свиньи домашней отмечаются низкие уровни накопления брома в нервной системе, что может указывать на наличие биогеохимического барьера в данной системе живых организмов, препятствующего проникновению элемента, несмотря на его хорошую миграционную способность, отмечаемую для природных сред. В продуктах питания, потребляемых жителями Томской области, наибольшие содержания брома отмечаются в кофе и молоке, а наименьшие – в гречневой крупе.*

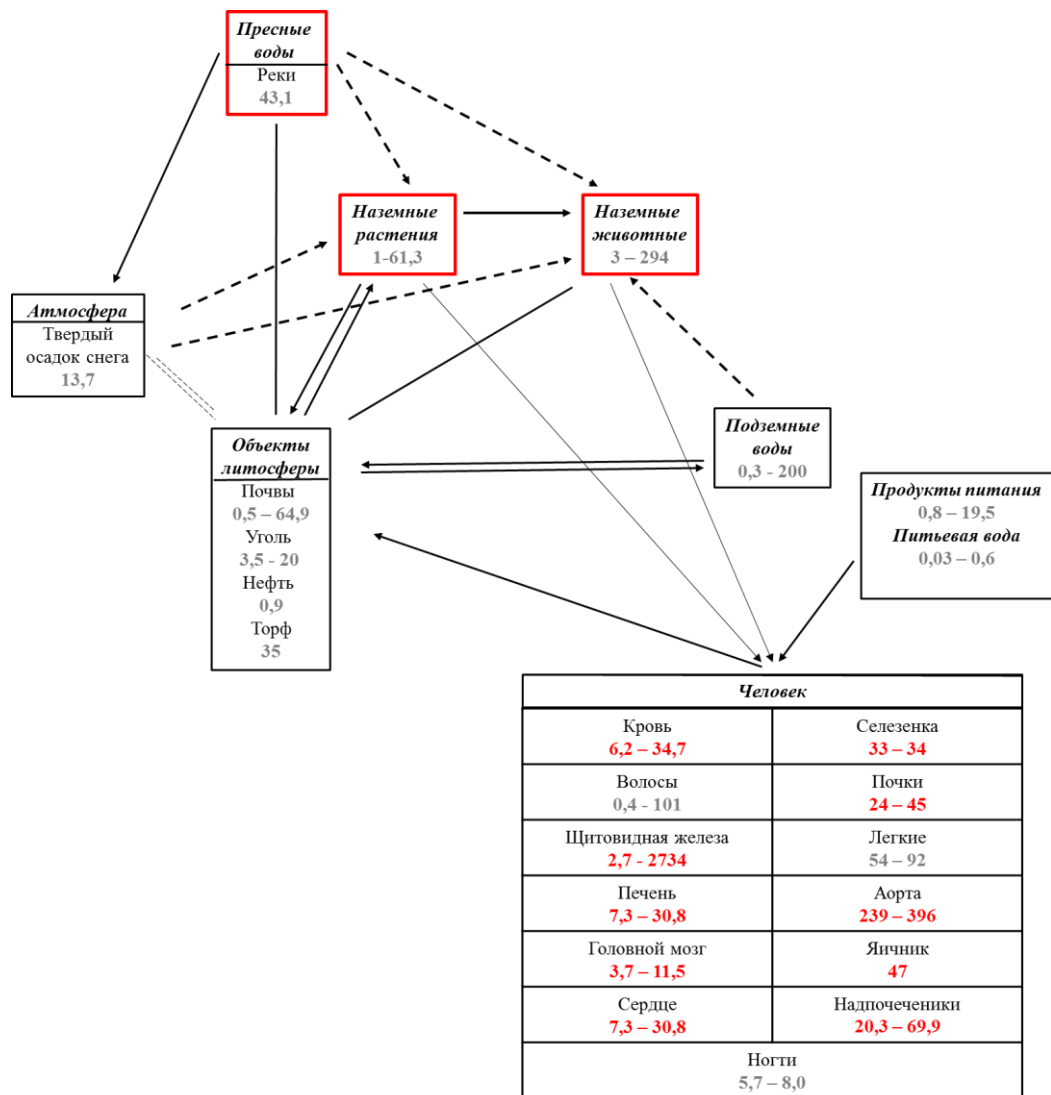
Изученные фактические данные, позволили нам определить наиболее напряженные районы Томской области в соответствии с особенностями распределения брома в компонентах окружающей среды (рисунок 6.23). На основе информации о содержании галогена в изучаемых объектах, нами была предложена дифференциация районов в соответствии с уровнями накопления брома в компонентах окружающей среды: под зеленым цветом подразумеваются низкие содержания элемента, не превышающие средне областных значений; желтым цветом обозначены средние концентрации элемента, или близкие к таковому; красным цветом показаны повышенные уровни накопления брома, значительно отличающиеся от средних показателей; серым цветом обозначено отсутствие данных.

Из рисунка 6.23 следует, что наиболее напряженным районом по бромю является Томский, в котором в трех из пяти изучаемых нами сред отмечаются повышенные уровни накопления элемента. В Молчановском и Шегарском районах отмечаются два объекта окружающей среды с повышенными содержаниями брома, при этом в последнем выделяются еще две среды по средним уровням концентрирования элемента. Наименьшие содержания брома в изученных объектах фиксируются в Каргасокском, Парабельском, Тегульдетском и Зырянском районах.



**Рисунок 6.23** – Схемы бромной нагрузки в соответствии с особенностями распределения брома в компонентах окружающей среды, где П – почвы, Н – накоп питьевых вод, В – волосы, К – кровь, ЩЖ – патологически измененная щитовидная железа

Проведенный анализ позволяет рассмотреть балансы распределения брома в пределах изучаемых сред Томской области (рисунок 6.24). Ввиду специфических особенностей территории (например, значительная удаленность от морей), мы не можем включить в наш анализ некоторые компоненты окружающей среды, которые, в глобальном масштабе, безусловно, оказывают влияние на накопление брома, но их роль в локальном масштабе менее значима. Так как Томский район области является наиболее напряженным по бром, и в связи с наличием на его территории большого количества потенциальных источников брома, отмечающихся, преимущественно, в его северной части, нами не учитывался фактический материал, отобранный в зоне Северного промышленного узла. Красным цветом выделены те компоненты окружающей среды, биосубстраты и др., содержания брома в которых превышают литературные данные, показанные на рисунке 2.3.



**Рисунок 6.24** – Упрощенная схема распределения брома в окружающей среде Томской области в рамках круговорота элемента в природе, в мг/кг (для объектов гидросферы – в мг/л)

Примечание: данные по пресным и подземным водам заимствованы из работы Колубаевой, 2015 (согласно автору данные воды отвечают фоновому уровню и расцениваются как свойственные экологически чистым районам); твердый осадок снега (фоновые регионы Западной Сибири) – по данным Шатилова, 2001; торф – по данным Межибор, 2009, нефть – по данным Рихванова и др., 2015.

Таким образом, обобщенный материал по уровням накопления брома в компонентах окружающей среды Томской области позволяет заключить, что абиотические компоненты характеризуются однородностью в накоплении элемента, в отличие от биотических. В целом, для территории Томской области, в сравнении с литературными данными, характерны значимо более высокие содержания брома в пресных водах и его накопление в наземных растениях в концентрациях выше 60 мг/кг и в животных организмах – около 300 мг/кг. Для организма человека характерны также высокие содержания элемента, однако его концентрирование отмечается не в волосах и легких, а в большей степени в крови, почках, аорте, щитовидной железе и др.

## ГЛАВА 7. БРОМ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА (НА ПРИМЕРЕ ТОМСКОГО РАЙОНА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)

Особенности концентрирования брома в объектах окружающей среды в условиях техногенеза изучены крайне слабо и требуют пристального внимания (*Иванов, 1996*). Томский район области, на наш взгляд, может быть примером для анализа техногеохимии элемента, поскольку на его территории сосредоточены основные промышленные объекты Томской области (зона СПУ), в том числе являющиеся потенциальными источниками данного галогена (см. главу 5). Несмотря на особый интерес к данному району, эколого-геохимические особенности брома на этой территории практически не изучены. Во многих работах, посвященных ее изучению, галоген рассматривается наряду с другими химическими элементами, без фокусирования на детальностях закономерностях его накопления и распределения в окружающей среде. Частично бром рассматривается в работе *Е.Г. Язикова (2006)*. Пожалуй, к единственным исследованиям, направленным на подробную детализацию и анализ брома, относятся исследования *Н.В. Барановской (2003, 2011)* и *Э. Терпак (2008)*. Последняя была выполнена в рамках дипломной работы. Так, на основе изучения крови и волос жителей, *Н.В. Барановской (2003)* было показано, что в пределах Томск-Северской агломерации происходит формирование устойчивой бромной субпровинции природно-техногенного характера. Кроме того, результаты исследований демонстрируют, что концентрации брома увеличиваются по мере приближения к зоне СПУ в молоке коров (*Бояркина и др., 1980*), в волосах детей (*Барановская, 2003*) и в твердом осадке снега (*Шатилов, 2001*), а показатели Br/U отношения в волосах имеют аналогию с изменением концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в почвах (*Baranovskaya, Rikhvanov, 2002*).

Для анализа изменения содержаний брома в окружающей среде по мере удаления/приближения к Томск–Северской промышленной агломерации (СПУ), в нашей работе все населенные пункты Томского района объединены в группы в соответствии с двумя принципами. Первый принцип основан на разделении населённых пунктов по секторам влияния СПУ с учетом главенствующего направления ветра. Таким образом, выделены северо–восточный, северо–западный, юго–восточный и юго–западный сектора. Второй принцип основан на расстоянии от СПУ, где в первую группу включены населённые пункты, входящие в 30–километровую зону влияния СПУ, во вторую – от 30 км и далее (см. приложение А). Подобного рода разделение населённых пунктов на группы не является новым и уже было использовано в ряде работ (*Шатилов, 2001; Язиков, 2006*), а также частично в работе *Д.В. Наркович (2012)*.

Гистограммы распределения содержаний брома в изучаемых объектах Томского района (рисунок 7.1) наряду со статистическими параметрами (таблица 7.1) указывают на отличное от нормального распределение элемента в объектах окружающей среды, при этом только для почв и донных отложений оно является близким к нормальному.

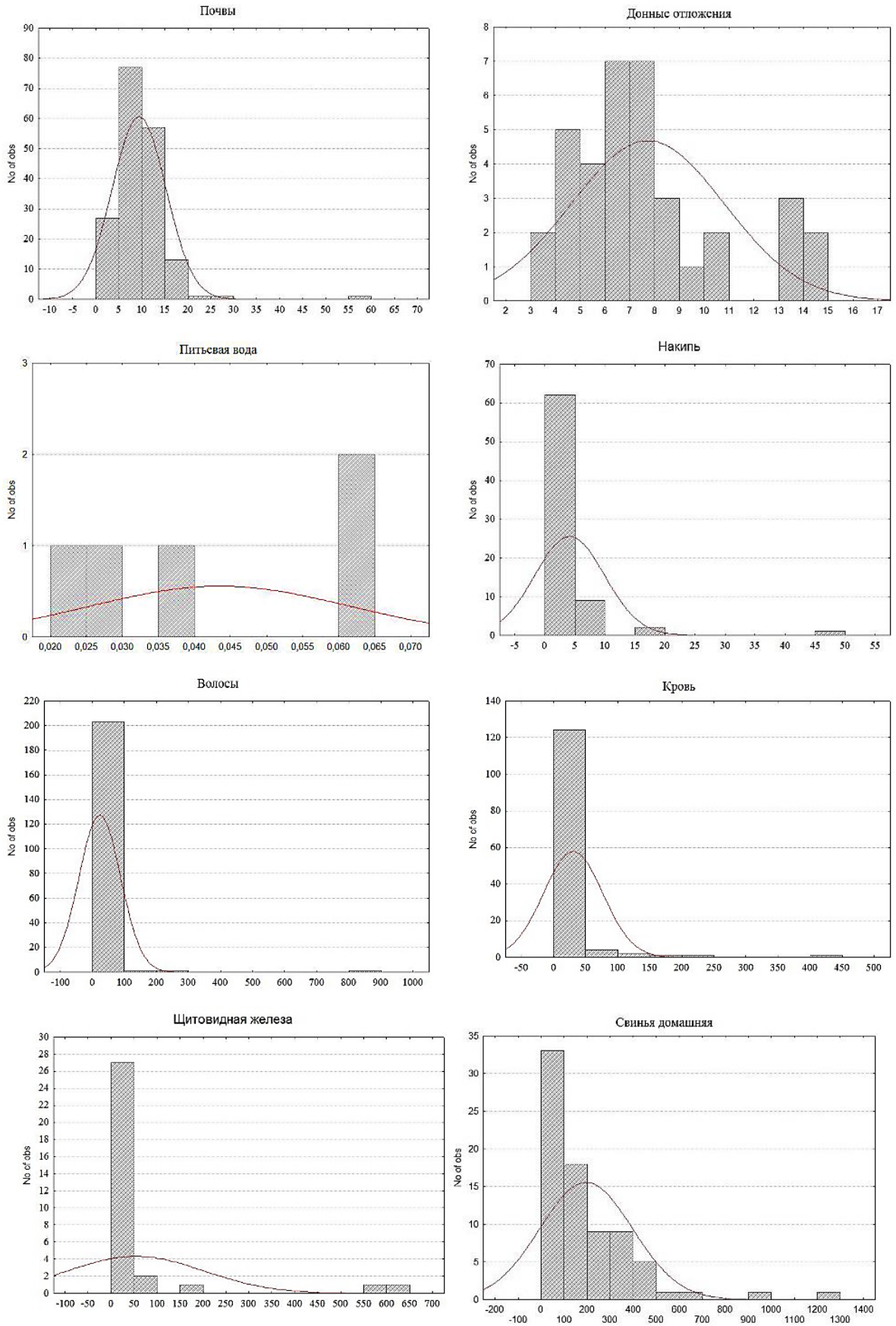


Рисунок 7.1 – Гистограммы распределения брома в компонентах окружающей среды Томского района (мг/кг, мг/л для питьевых вод)

Минимальные показатели коэффициента вариации наблюдаются для брома в донных отложениях, питьевой воде и почвах, и составляют 40%, 41%, 65%, соответственно. Максимальные значения коэффициента вариации фиксируются в патологически измененной щитовидной железе (280%) и в волосах (290%), указывая на крайне неоднородное распределение элемента в данных биосубстратах.

*Таблица 7.1 – Статистические параметры распределения содержаний брома в компонентах окружающей среды Томского района, мг/кг*

Объект	N	X	$\lambda$	Min	Max	Mo	Me	V, %
Почва	182	9,1	0,4	0,5	59,5	0,5	8,9	65
Донные отложения	36	7,7	0,5	3,4	14,9	7,4	7,2	40
Питьевая вода, мг/л	5	0,04	0,008	0,025	0,06	–	0,04	41
Накипь питьевых вод	83	3,8	0,6	0,2	47,7	0,5	2,8	144
Волосы детей	207	16,7	1,0	0,3	895	13,0	13,0	290
Кровь человека	133	30,0	4,0	4,2	434	12,0	21,0	133
Щитовидная железа (патологически измененные ткани)	32	8,1	2,0	2,2	619	5,4	5,4	280
Органы и ткани свиной домашней	78	194	22,7	5,5	1204	–	123,3	103

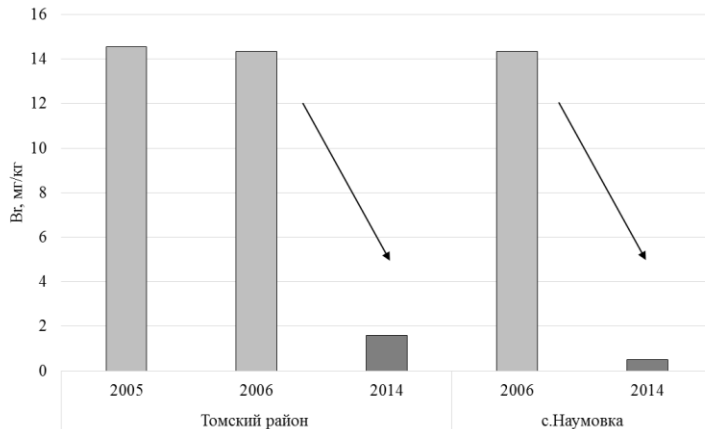
*Примечание: N- количество проб, X - среднее значение;  $\lambda$  – стандартная ошибка; Min и Max – минимальное и максимальное значения соответственно, Mo – мода, Me - медиана, V – коэффициент вариации.*

### **7.1 Бром в абиотических компонентах природной среды**

**Почва и донные отложения.** На фоне всей Томской области, Томский район характеризуется самыми низкими содержаниями брома в почвах, но при этом именно в нем отмечается наибольший разброс минимально – максимальных значений (таблица 6.1), что указывает на наличие факторов, в значительной мере искажающих фоновое распределение элемента. Согласно ранее проведенным исследованиям (Язиков, 2006), наиболее высокие содержания галогена в почвах отмечаются вблизи Томского нефтехимического комбината, расположенного в зоне влияния Томск–Северской промышленной агломерации. Что касается г. Томска, высокие уровни накопления брома фиксируются вблизи таких промышленных предприятий, как ОАО «Фармстандарт–Томскхимфарм», ЗАО «Томский приборный завод» и ОАО «Томский электроламповый завод» (Жорняк, 2009).



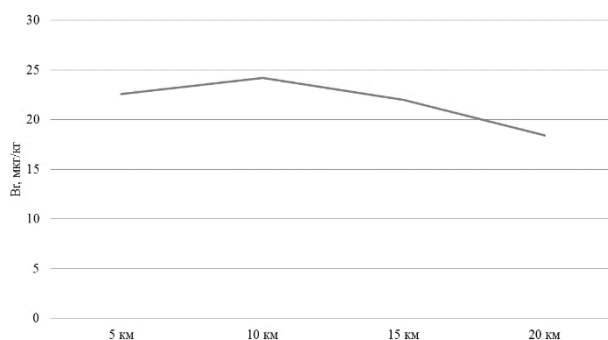
Анализ изменения содержаний брома в Томском районе во времени, демонстрирует, что в последние годы произошло значительное снижение накопления элемента в почвах. Это также характерно и для отдельных населенных пунктов, в том числе, расположенных в зоне СПУ (рисунок 7.2). При этом в почвах, отобранных в 2005 и 2006 гг. отмечаются значимые положительные корреляционные связи брома с Sm и Tb, а в почвах 2014 г. – с Sr, что указывает на изменение геохимической обстановки в почвах на территории района.



*Рисунок 7.2 – Изменение содержаний брома в почвах Томского района и в с. Наумовка с годам, мг/кг*

В динамике изменения брома в зависимости от удаленности от зоны Томск-Северской промышленной агломерации не наблюдается ни тенденции уменьшения, ни увеличения концентраций элемента в разные года, т.к. уровни накопления брома на разных расстояниях являются практически идентичными.

В работе *Н.В. Барановской (2011)* была проанализирована динамика изменения брома в почвах Челябинской области, где имеется предприятие ядерно-топливного цикла «Маяк» (подобное СХК в Томском районе) и отсутствуют крупные нефтеперерабатывающие комплексы. Было показано, что содержания брома в почвах уменьшаются по мере удаления от этого промышленного предприятия. Нами же, в 2014 г. были проведены комплексные исследования на территории Франции, в регионе Гран Эст, где отсутствует предприятие ЯТЦ, но имеется крупный нефтеперерабатывающий завод. Как показывают результаты (рисунок 7.3), уровни накопления брома (бромид – иона) в почвах также имеют тенденцию к уменьшению по мере удаления от данного предприятия.



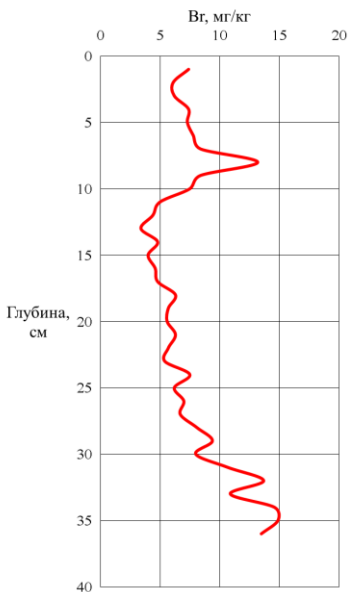
*Рисунок 7.3 – Изменение содержаний Br<sup>-</sup> в почвах Франции по мере удаления от нефтеперерабатывающего завода, мкг/кг*

При этом также происходит уменьшение отношения  $\text{Br}^-/\text{I}^-$ , но увеличение  $\text{Br}^-/\text{F}^-$  при удалении от нефтеперерабатывающего завода, однако, отношение  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  является стабильным (таблица 7.2).

**Таблица 7.2** – Изменение отношений брома с другими элементами группы галогенов в почвах по мере удаления от нефтеперерабатывающего завода (Франция)

Расстояние от нефтеперерабатывающего завода, км	$\text{Br}^-/\text{F}^-$	$\text{Br}^-/\text{Cl}^-$	$\text{Br}^-/\text{I}^-$
5	0,0041	0,002	174
10	0,0042	0,002	173
15	0,0042	0,002	157
20	0,0058	0,002	142

На примере донных отложений, отобранных в оз.Черное, расположенном к северо-востоку от г. Томск в зоне непосредственного влияния Сибирского химического комбината, (Иванов, 2016), отчетливо отмечаются пики повышенных концентраций элемента, фиксирующиеся на глубине 10 см, а также начиная с глубины 30 см (рисунок 7.4). При этом



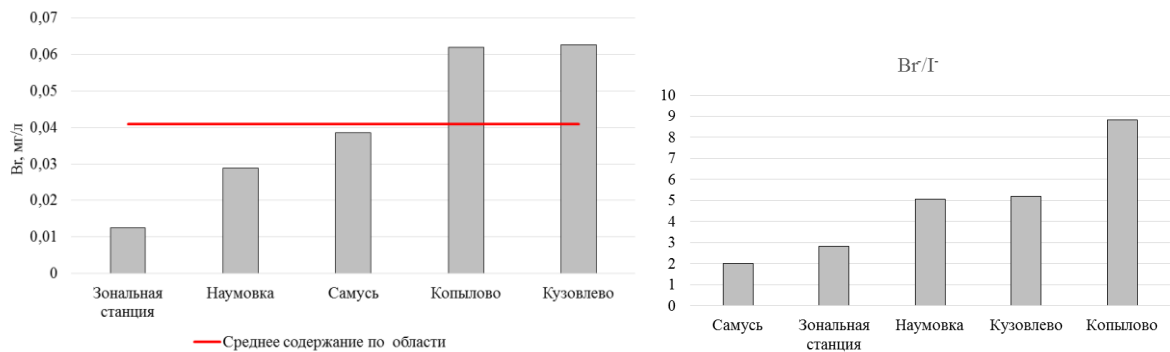
распределение брома в рассматриваемых отложениях не совпадает ни с одним из других изученных 28 химических элементов. В донных отложениях данного озера отмечаются значимые положительные корреляционные связи брома практически со всеми химическими элементами (Sm, Lu, U, Yb, As, Na, La, Ce, Th, Cr, Hf, Ba, Ag, Cs, Sc, Tb, Rb, Fe, Ta, Co, Eu, Sb) и значимые отрицательные с Ca и Sr, что может указывать на возможное влияние как природных, так и антропогенных факторов.

**Рисунок 7.4** – Распределение брома в донных отложениях оз. Черное с глубиной, мг/кг

Таким образом, несмотря на низкие содержания брома в почвах Томского района, для них характерен наибольший разброс минимально-максимальных значений. Отмечаются тенденции уменьшения накопления брома в почвах в последние годы, при этом фиксируется изменение в них геохимической обстановки в целом. Анализ изучения брома в почвах Франции демонстрирует уменьшение содержаний элемента по мере удаления от нефтеперерабатывающего завода, с параллельным уменьшением  $\text{Br}^-/\text{I}^-$  отношения и увеличением  $\text{Br}^-/\text{F}^-$  отношения, при фиксирующейся стабильности отношения  $\text{Br}^-$  к  $\text{Cl}^-$ . В донных отложениях отмечаются

повышенные содержания элемента на глубине 10 м и далее от 30 м, при этом фиксируются значимые геохимические ассоциации брома практически со всеми изученными элементами.

**Питьевая вода и накипь питьевых вод.** Уровни накопления бромид – иона в питьевых водах населенных пунктов Томского района не превышают ПДК, установленных для элемента. Наименьшие содержания брома отмечаются в водах пос. Зональная станция, а наибольшие, превышающие средние областные содержания – в пос. Копылово и д. Кузовлево (рисунок 7.5 слева). Минимальный показатель  $Br/\Gamma$  отношения отмечается в пос. Самусь, а максимальный в пос. Копылово (рисунок 7.5 справа). В питьевых водах Томского района для брома характерна значимая отрицательная связь с хромом.

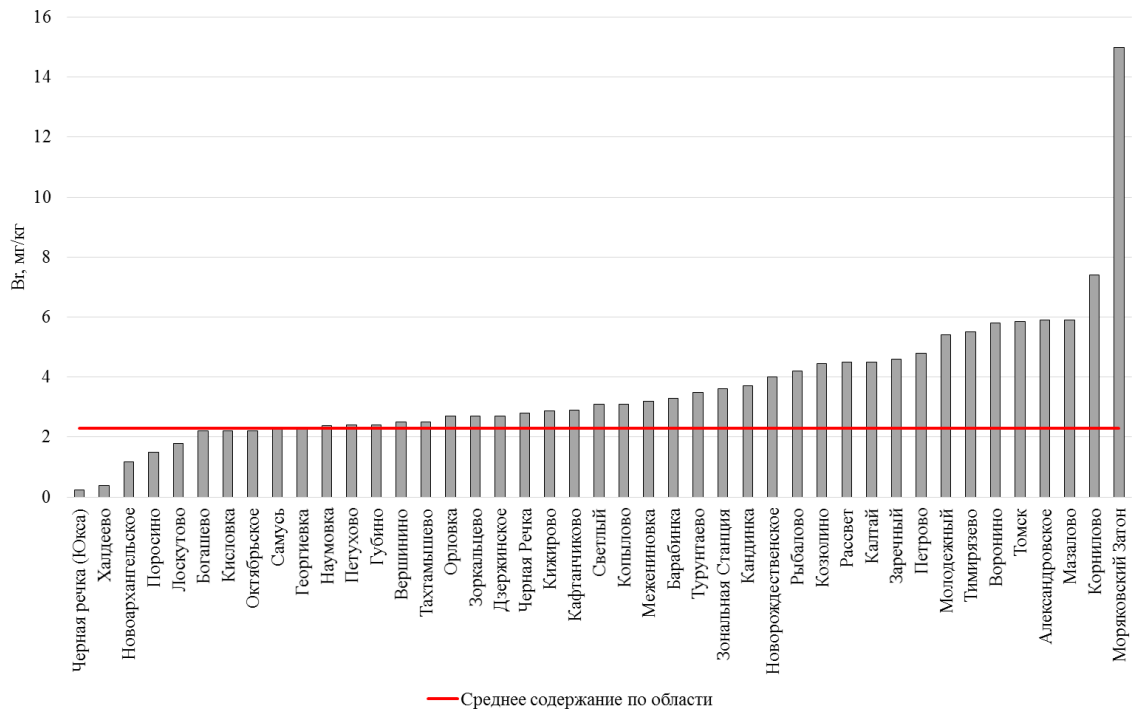


**Рисунок 7.5** – Ранжирование населенных пунктов Томского района по уровню накопления бромид – иона в питьевых водах, мг/л (слева) и по показателю  $Br/\Gamma$  (справа)

Содержания брома в накипи питьевых вод Томского района характеризуются повышенными содержаниями элемента, относительно других районов области, а также довольно высоким разбросом минимально–максимальных значений, при коэффициенте вариации равным 144% (таблица 7.1). Повышенные концентрации брома в накипи питьевых вод отмечаются в 35 из 43 рассматриваемых нами населенных пунктов данного района (рисунок 7.6).

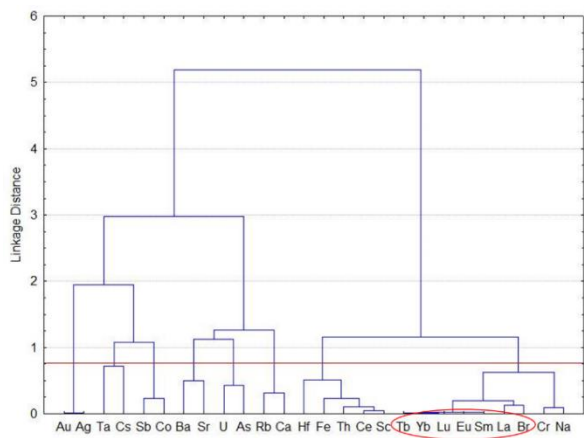
Вопрос о содержаниях галогена в накипи питьевых вод частично обсуждался в работах *Е.Г. Язикова (2006)* и *Т.А. Монголиной (2011)*. К сожалению, в работе первого автора пространственная локализация брома в накипи не находит объяснения. Согласно Т.А. Монголиной источником элемента является нефтехимический комбинат (ТНХК) и Сибирский химический комбинат (СХК), расположенные в пределах данного района. Анализ имеющейся информации позволяет нам также сделать предположение о преимущественном влиянии на накопление элемента в накипи данного района техногенных факторов, что ярко выражено при рассмотрении корреляционных связей брома.

Значимые корреляционные связи брома в накипи питьевых вод Томского района отмечаются с редкоземельными элементами: La, Sm, Eu, Lu, Yb, Tb (рисунок 7.7), характерными для предприятий ядерно–топливного цикла, к каковому на изучаемой территории относится только СХК.

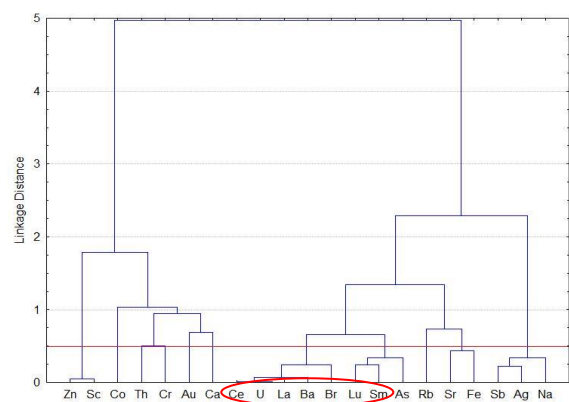


**Рисунок 7.6** – Ранжирование населённых пунктов Томского района по содержанию брома в накипи питьевых вод, мг/кг

Примечательно, что в накипи питьевых вод, отобранных у жителей, проживающих вблизи комбината ядерно – топливного цикла ПО «Маяк» в Челябинской области, также отмечаются значимые геохимические ассоциации брома с лантаном, которые тяготеют к Lu и Sm (рисунок 7.8).



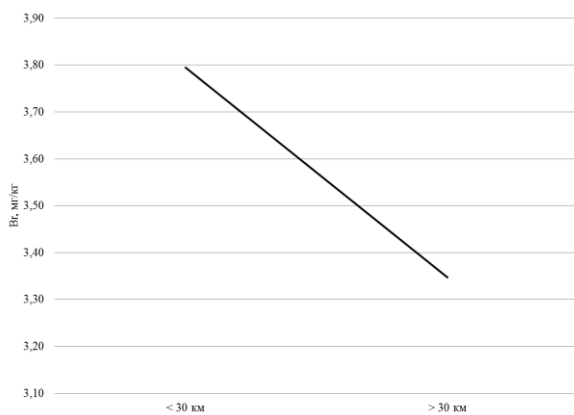
**Рисунок 7.7** – Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в накипи питьевых вод Томского района ( $1\text{-Person } r(0,05) = 0,89$ ; объем выборки – 83 пробы)



**Рисунок 7.8** – Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в накипи питьевых вод Челябинской области ( $1\text{-Person } r(0,05) = 0,49$ ; объем выборки – 15 проб)

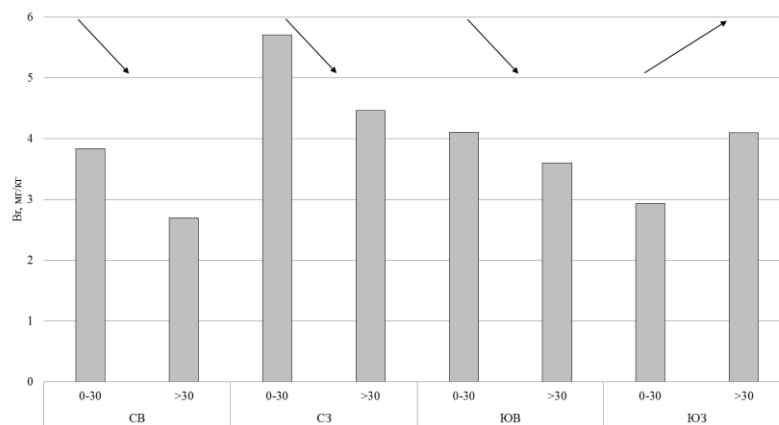
Однако, не стоит исключать и воздействие иного природно-антропогенного фактора. В зоне Обь-Томского междуречья, в пределах которого расположены 16 из 43 изучаемых нами населённых пунктов Томского района (в том числе пос. Моряковский Затон, где обнаруживается абсолютный максимум содержания брома в накипи питьевых вод), фиксируется локальная гидрохимическая аномалия. Она заключается в незакономерном возникновении во времени и не эквивалентных друг другу количествах содержания натрия и хлора, сопровождающихся повышением минерализации вод. По мнению ряда ученых эта аномалия связана с эксплуатацией Томского водозабора, что привело к снижению напоров вод палеогенового комплекса и, как следствие, перетоков вод из нижележащего верхнемелового комплекса (Колубаева Ю.В., 2015). Прямой информации, указывающей на повышенные концентрации брома на данной территории вследствие описанной выше аномалии, не имеется, однако, это можно предположить ввиду сразу нескольких причин. Во-первых, содержания брома, как правило, увеличиваются с ростом минерализации и с глубиной залегания водоносных горизонтов (Иванов, 1994; Красинцева, 1968; Розен, 1970). Во-вторых, обычно концентрации брома увеличиваются параллельно увеличению общего количества хлора (Розен, 1970). Кроме того, исследования Гуревича И.В. (1961), основанные на анализе более 300 проб подземных вод, показывают четкую зависимость между коэффициентами  $Na/Cl$  и  $Cl/Br$  (Розен, 1970).

Динамика изменения брома в накипи питьевых вод показывает, что наблюдается уменьшение концентраций элемента по мере удаления от зоны воздействия Томск–Северской промышленной агломерации (рисунок 7.9).



**Рисунок 7.9** – Содержание брома в накипи питьевых вод по мере удаления от Томск–Северской промышленной агломерации

Данная тенденция сохраняется во всех направлениях, за исключением юго-западного сектора (рисунок 7.10), в котором фиксируется описанная выше гидрохимическая аномалия.



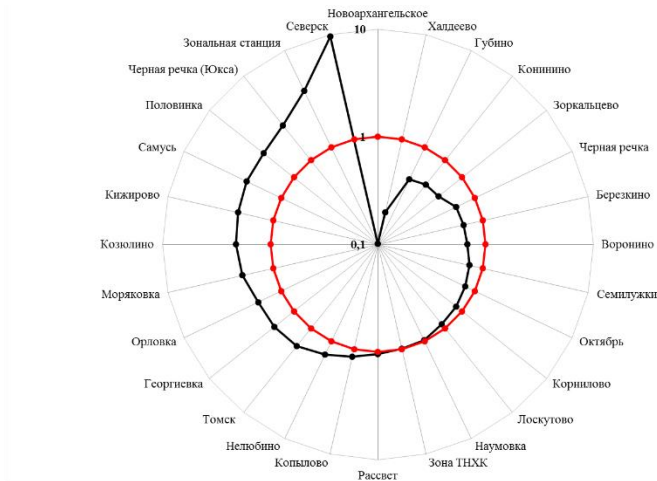
**Рисунок 7.10** – Содержание брома в накипи питьевых вод по мере удаленности от Томск–Северской промышленной агломерации по секторам

Корреляционный анализ, осуществленный по аналитическим данным, отобранным в 2014 г., демонстрирует наличие положительных значимых корреляционных связей брома с натрием, железом, мышьяком, цезием, лантаном, европием, гафнием, торием и ураном в накипи питьевых вод, что несколько отличается от корреляций, наблюдаемых в предыдущие годы (рисунок 7.7), при этом сохраняются значимые положительные связи с Eu и La.

Таким образом, содержания брома в питьевых водах населенных пунктов Томского района не превышают ПДК, установленного для элемента. Содержания же галогена в накипи питьевых вод района характеризуются наибольшими концентрациями относительно других районов области. Максимальные количества элемента отмечаются в пос. Моряковка. Отмечающиеся значимые корреляционные связи брома в накипи питьевых вод Томского района указывают на влияние предприятия ядерного-топливного цикла и схожи с таковыми, характерными для Челябинской области. В целом, отмечается уменьшение содержаний элемента по мере удаления от зоны СПУ, за исключением юго-западного сектора, в котором фиксируется природно-техногенная гидрохимическая аномалия.

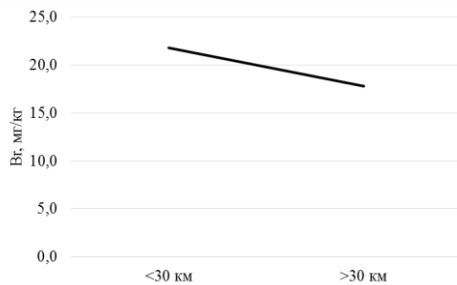
## 7.2 Бром в биотических компонентах природной среды

**Волосы детей.** Результаты изучения брома в волосах детей Томского района области показывают, что пространственное распределение элемента на территории района является неравномерным, на что указывают и статистические показатели (таблица 7.1), например, коэффициент вариации, являющийся максимальным в данном районе и составляющий 290%. Анализ накопления брома в волосах детей Томского района демонстрирует наибольшие уровни концентрирования элемента в составе волос жителей г. Северска, пос. Зональная станция, Черная речка (Юкса) и др. (рисунок 7.11).



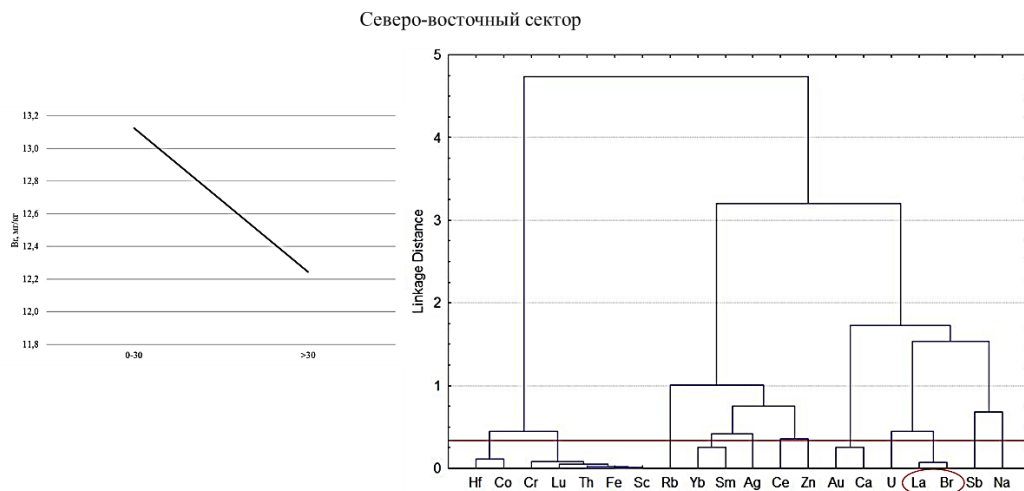
**Рисунок 7.11** – Коэффициенты концентрации брома в волосах детей населенных пунктов Томского района относительно среднеобластных значений

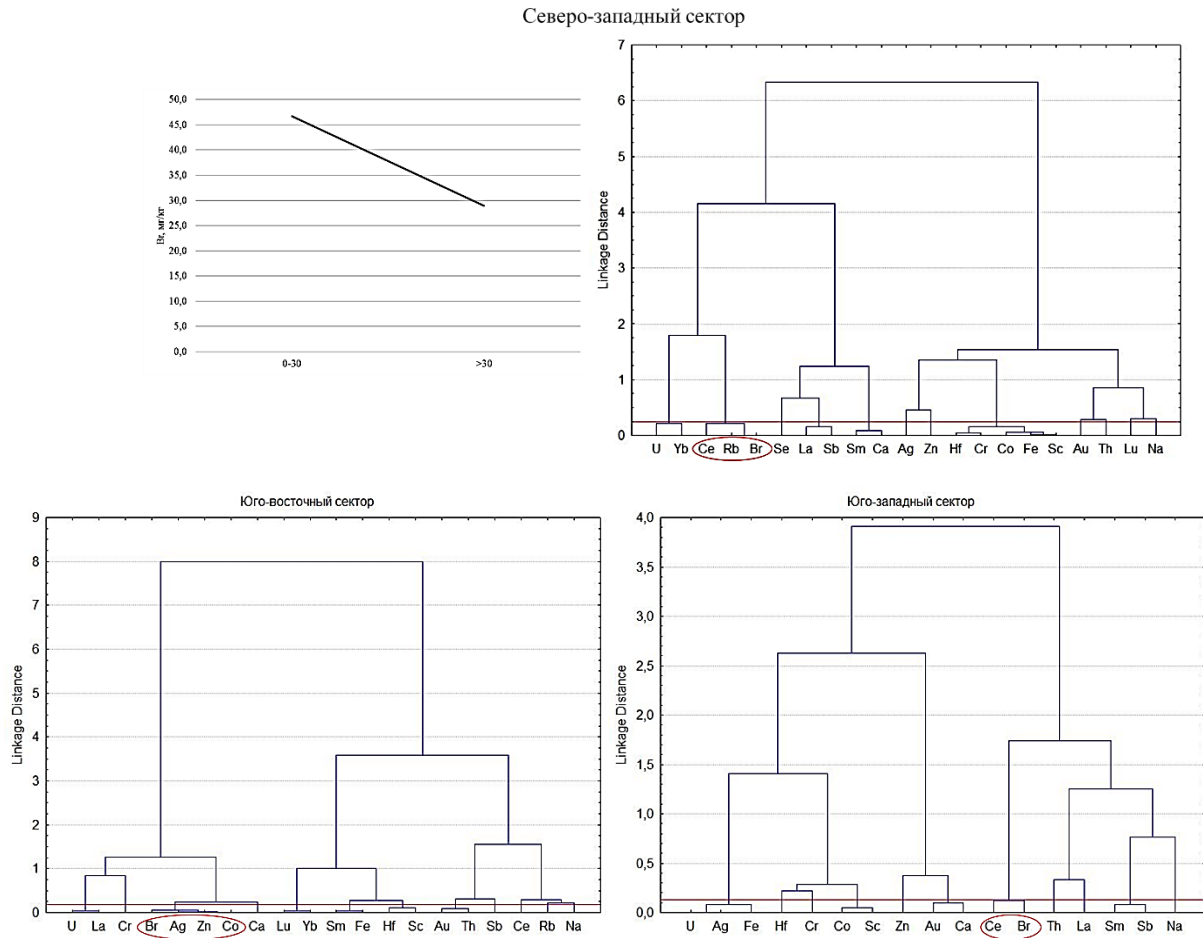
Подобно бром в накипи питьевых вод, при анализе поведения элемента в волосах детей по мере удаления от основных промышленных объектов территории СПУ, также отмечается уменьшение концентраций элемента (рисунок 7.12).



**Рисунок 7.12** – Содержание брома в волосах детей по мере удаленности от Томск-Северской промышленной агломерации

При рассмотрении изменения содержаний брома в волосах детей, а также корреляционных связей галогена с другими химическими элементами по отдельным секторам Томского района (рисунок 7.13), отмечается схожая закономерность, заключающаяся в уменьшении содержаний элемента по мере удаления от СПУ в северо-восточном и северо-западных секторах. Что касается двух других секторов, ввиду отсутствия данных, мы не можем судить об изменениях в накоплении элемента.





**Рисунок 7.13** – Дендрограммы корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в волосах детей по секторам Томского района и изменение содержаний брома (мг/кг) по мере удаления от зоны СПУ

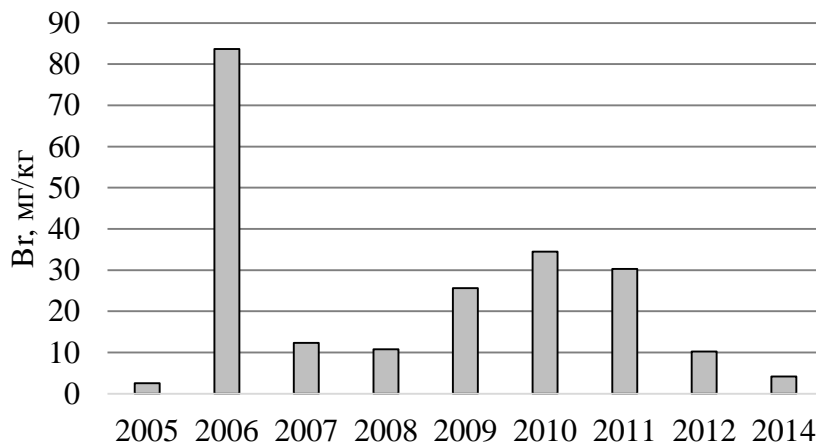
В северо-восточном направлении отмечаются значимые ассоциации брома в волосах детей с лантаном в группе U–La, связанные с Sb–Na. В северо-западном направлении значимые связи брома фиксируются в группе Ce–Rb, связанной с U–Yb. Мы предполагаем, что населенные пункты северо-восточного и северо-западного секторов подвержены комплексному природно – антропогенному влиянию, в том числе воздействию от промышленных предприятий – источников выбросов брома в окружающую среду, располагающихся в пределах зоны СПУ.

Стоит обратить особое внимание на геохимические ассоциации элемента в юго-восточном и юго-западном секторах. Если в юго–западном секторе еще отражается возможное техногенное влияние, то в юго-восточном секторе отмечаются новые, ранее не наблюдавшиеся ассоциации элемента (Ag–Zn–Co). Особенно примечательна здесь значимая корреляционная связь брома с серебром. Этот металл – один из наиболее устойчивых к действию брома, даже при повышенных температурах и в присутствии влаги, тогда как большинство металлов с трудом реагируют с безводным бромом из-за образования на их поверхности защитной пленки бромида.



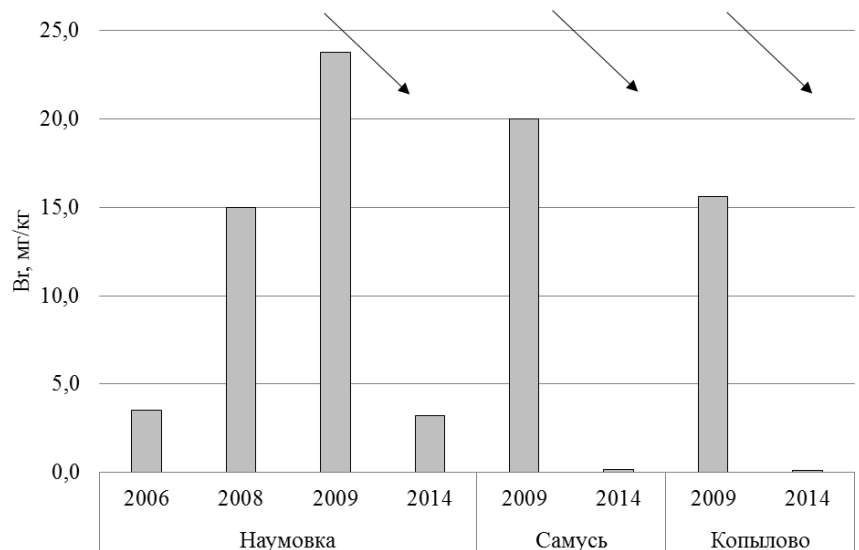
Известен факт, что собственные минералы брома очень редки и представлены только бромаргиритом ( $\text{AgBr}$ ), иодобромитом ( $2\text{AgCl}\cdot 2\text{AgBr}\cdot \text{AgI}$ ) и эмболитом ( $\text{Ag}(\text{Cl}, \text{Br})$ ). Стоит отметить, что подобная корреляция для брома отмечается не только в волосах жителей данной зоны, но также в органах и тканях женского организма из с. Кафтанчиково, расположенного в этом же секторе (Барановская и др., 2016). Таким образом, данная особенность, фиксирующаяся уже в двух объектах исследования, не может считаться случайной, а скорее, закономерной и обусловленной определенными факторами и условиями данной зоны.

Результаты изменения содержаний брома во времени позволяют заключить, что в последние годы отмечается понижение содержаний галогена в волосах детей Томского района (рисунок 7.14), при этом на общем фоне значительно выделяются населенные пункты СПУ, в которых также отмечается уменьшение концентраций элемента (рисунок 7.15). Это может быть связано с фактом остановки ректоров на Сибирском химическом комбинате, являющимся потенциальным источников выбросов брома в окружающую среду (Барановская, Рихванов, 2002; Барановская, 2003) и изменением характера производства на данном предприятии, а также интенсивностью производства на нефтехимическом комбинате «Сибур».



**Рисунок 7.14** – Изменение содержаний брома в волосах детей Томского района с годами, мг/кг

**Рисунок 7.15** – Изменение содержаний брома в волосах детей населенных пунктов, входящих в СПУ Томского района с годами, мг/кг

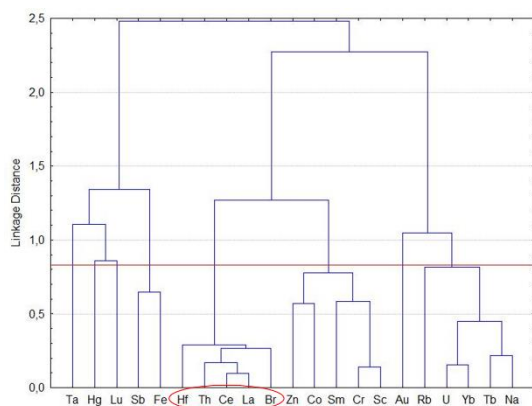


**Кровь человека.** По статистическим параметрам распределения брома в крови жителей Томского района можно судить о его крайне неравномерном распределении. Коэффициент вариации в крови жителей является максимальным по сравнению с другими районами области и составляет 153% (таблица 6.5). Анализ показывает, что наибольшие концентрации элемента наблюдаются в данном биосубстрате жителей г. Северск (таблица 7.3), что также было отмечено нами и для волос детей.

**Таблица 7.3** – Коэффициент концентрации брома в крови жителей населенных пунктов Томского района, рассчитанный относительно различных показателей

Населенный пункт	Коэффициент концентрации (относительно среднеобластных значений)	Относительно кларка ноосферы (Глазовский, 1982)	Относительно кларка морской воды (Виноградов, 1957)
Лоскутово	0,3	0,3	0,1
Корнилово	0,4	0,4	0,1
Самусь	0,5	0,4	0,2
Кисловка	0,5	0,5	0,2
Кандинка	0,5	0,5	0,2
Томск	0,9	0,8	0,3
Наумовка	1,0	0,9	0,4
Черная речка (Юкса)	1,5	1,3	0,5
<b>Северск</b>	<b>5,8</b>	<b>5,2</b>	<b>2,0</b>

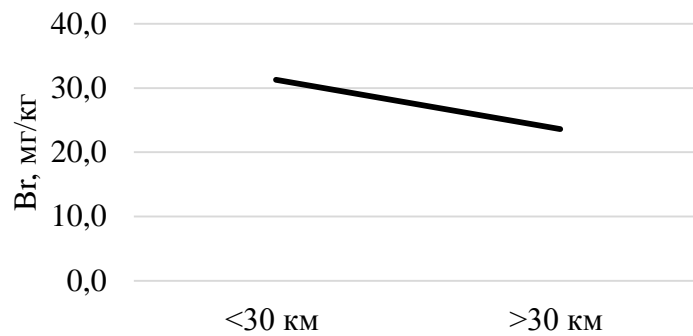
В крови жителей Томского района нами были зафиксированы значимые корреляции брома с Hf, Th, Ce и La (рисунок 7.16), которые могут указывать как на наличие природных геохимических аномалий (например, циркон-ильменитовые месторождения), так и на антропогенное воздействие. Так, в работе Шатилова (2001) на примере изучения твердого осадка снегового покрова показано, что данные элементы являются специфичными для теплоэнергетической промышленности и предприятий ядерно – топливного цикла. Некоторые



связи брома являются идентичными таковым, обнаруженным нами в волосах жителей, проживающих в северо–восточном и северо–западном секторах района.

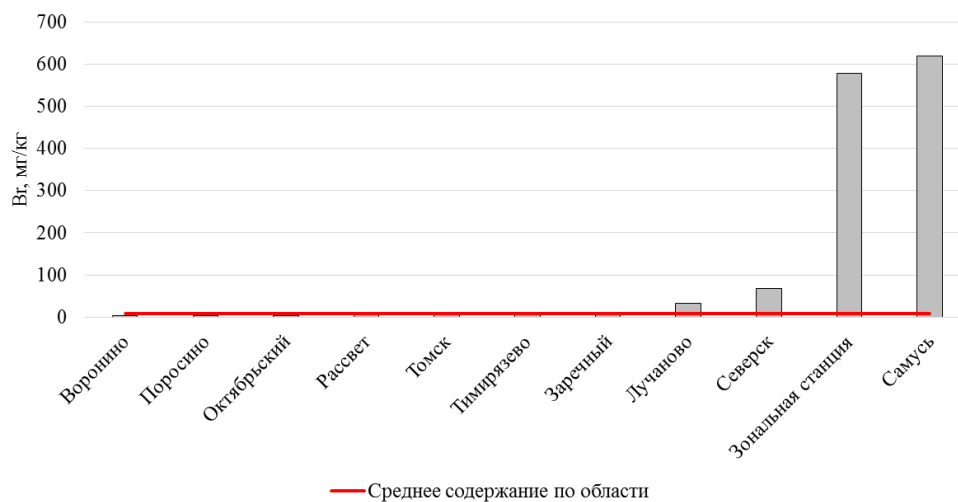
**Рисунок 7.16** – Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в крови жителей Томского района ( $1\text{-Person } r(0,05) = 0,83$ ; объем выборки – 133 пробы)

При этом анализ показывает, что также, как и для всех рассмотренных нами ранее объектов исследования, отмечается тенденция уменьшения брома в крови жителей при удалении от Томск-Северской промышленной агломерации (рисунок 7.17).



**Рисунок 7.17** – Содержание брома в крови жителей по мере удаленности от СПУ

**Щитовидная железа (патологически измененные ткани).** Анализ фактического материала по щитовидной железе позволяет утверждать о крайнем неоднородном распределении брома в этом биоматериале жителей, проживающих в Томской районе. Однако, если на примере содержаний галогена в волосах детей и крови жителей было показано максимальное его накопление в г.Северск, то по результатам анализа щитовидной железы, данный населенный пункт не характеризуется максимальными концентрациями элемента, которые, однако, отмечаются в щитовидной железе населения, проживающего в поселках Зональная Станция и Самусь (рисунок 7.18). При этом значимые связи брома в щитовидной железе жителей Томского района отмечаются исключительно с церием. Кроме того, отмечается уменьшение брома в данном биосубстрате жителей при удалении от Томск-Северской промышленной агломерации.

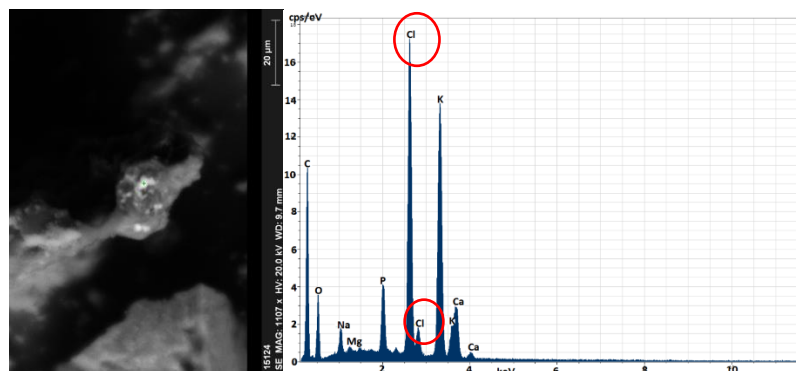


**Рисунок 7.18** – Ранжирование населенных пунктов Томского района по уровням накопления брома (мг/кг) в патологически измененной щитовидной железе жителей

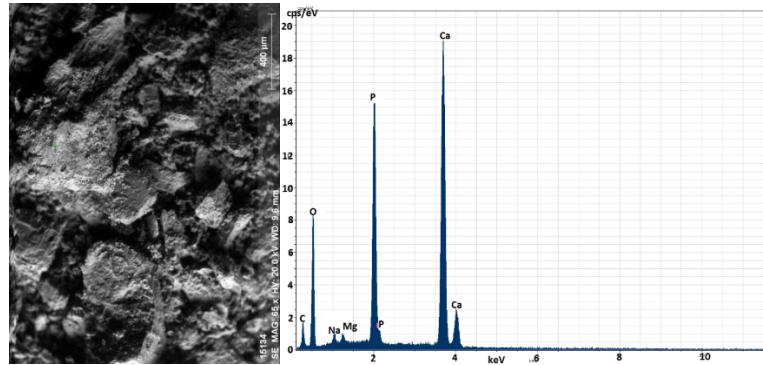
Таким образом, распределение брома в биосубстратах, отобранных в Томском районе области является крайне неоднородным. Наблюдается общая тенденция уменьшения содержаний элемента по мере удаления от зоны Томск-Северской промышленной агломерации, при этом отмечаются идентичные геохимические ассоциации элемента в рассматриваемых биоматериалах (церий, лантан). Сравнительный анализ изучения брома в волосах по годам демонстрирует, что наблюдается значительное уменьшение содержаний элемента как в целом по району, так и в его отдельных населенных пунктах.

**Органы домашней свиньи.** На примере двух поросят, отобранных в разных секторах Томского района, очень ярко отражаются особенности накопления брома, обусловленные разной степенью антропогенной нагрузки. Так, в органах и тканях поросенка, отобранного в населенном пункте Кижирово, расположенном в пределах 30-км зоны воздействия СПУ в северо-западном направлении, отмечаются наиболее высокие уровни накопления брома, чем в таковых поросенка, взятого из с. Верхнее Сеченово, находящегося на расстоянии 38 км от СПУ в юго-западном направлении (см. рисунок 6.11).

Необходимо отметить фиксирование значимых корреляционных связей брома с U и Na в органах и тканях свиньи домашней деревни Кижирово, и исключительно с натрием в поросенке из села Верхнее Сеченово. Помимо этого, при изучении состава минеральной фазы золы трубчатой кости свиньи домашней (Шакирова, 2013) двух территорий была выявлена следующая особенность: наличие хлора в изучаемой ткани свиньи домашней д. Кижирово (рисунок 7.19) и его отсутствие в данной ткани животного, отобранного в с. Верхнее Сеченово (рисунок 7.20). Подобная закономерность отмечается для подземных вод меловых отложений, где в зоне расположения д. Кижирово фиксируется наличие содержаний хлорид – иона и его отсутствие в пределах расположения с. Верхнее Сеченово (Янкович, 2017).



**Рисунок 7.19** – Состав минеральной фазы золы трубчатой кости свиньи домашней (*Sus Scrofa Domestica*) деревни Кижирово; слева - электронная микроскопия (увеличение 15120); справа – энергодисперсионный спектр содержания химических элементов в пробе.



**Рисунок 7.20** – Состав минеральной фазы золы трубчатой кости свиньи домашней (*Sus Scrofa Domestica*) села Верхнее Сеченово; слева - электронная микроскопия (увеличение 15130); справа – энергодисперсионный спектр содержания химических элементов в пробе.

Таким образом, в органах и тканях поросенка, отобранного в зоне техногенного влияния промышленных предприятий Томского района, фиксируются повышенные содержания брома по сравнению с таковыми в организме поросенка, отобранного в противоположном направлении. Кроме того, в органах и тканях первого также фиксируется наличие хлора, близкого к бром химического элемента, что находит отражение в распространении хлорид – иона в подземных водах меловых отложений.

Весь представленный материал был обобщен, полученные результаты представлены в таблице 7.4. Необходимо отметить, что для изучаемых нами сред отмечается общая закономерность, заключающаяся в уменьшении содержаний брома по мере удаления от зоны Томск-Северской промышленной агломерации. Выделяются несколько населенных пунктов, входящих в зону СПУ по повышенным содержаниям элемента относительно среднеобластных значений. Так, высокие уровни накопления брома фиксируются в почвах, накипи питьевых вод и крови жителей с. Наумовка; в питьевых водах, накипи питьевых вод и волосах детей пос. Копылово; в накипи питьевых вод, органах и тканях свиньи домашней д. Кижирово; накипи питьевых вод и в волосах детей г. Томска, в волосах детей и крови жителей г. Северск и д. Черная речка и др. Корреляционный анализ, проведенный в объектах исследования, отобранных в разные года, позволяет установить возможное изменение геохимической обстановки в почвах и накипи питьевых вод в последние годы и его относительную стабильность, характерную для волос детей Томского района.

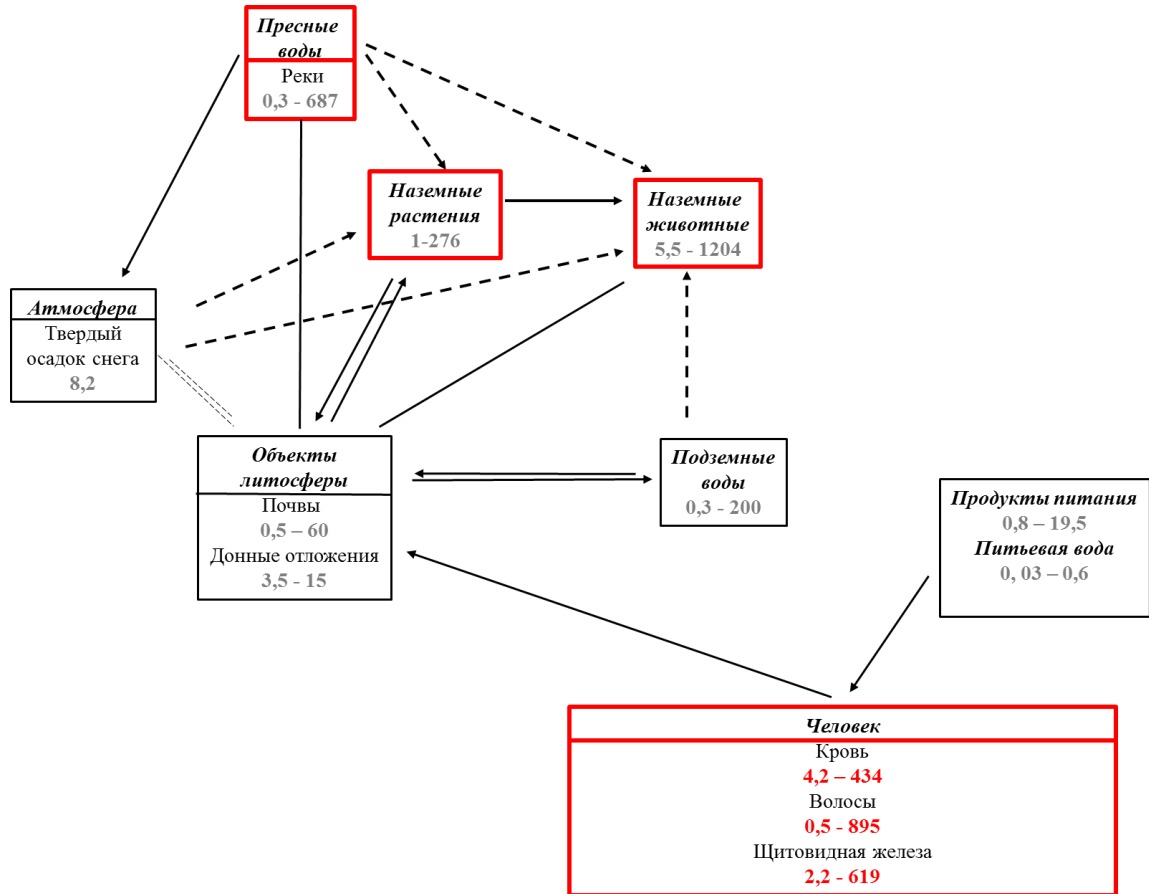
**Таблица 7.4** – Обобщение проанализированных данных по тенденции накопления брома, геохимическим ассоциациям элемента, а также выделению населенных пунктов, в которых содержания элемента превышают среднеобластные значения

Объект исследования	Тенденция накопления элемента по мере удаления от зоны СПУ (< 30 км – > 30 км)					Населенные пункты, в которых содержания брома превышает среднеобластные значения	Значимые геохимические ассоциации брома (по результатам коэффициентов парной корреляции)	
	общая	сектора					до 2014 г	2014 г
		СВ	СЗ	ЮВ	ЮЗ			
Почвы	–	–	–	–	–	Наумовка, Новоархангельское	Sm, Tb	Sr
Донные отложения	–	–	–	–	–	–	Sm, Lu, U, Yb, As, Na, La, Ce, Th, Cr, Hf, Ba, Ag, Cs, Sc, Tb, Rb, Fe, Ta, Co, Eu, Sb <b>Ca, Sr</b>	
Питьевая вода	–	–	–	–	–	Копылово, Кузовлево	–	<b>Cr</b>
Накись питьевых вод	↘	↘	↘	↘	↗	Александровское, Барабинка, Вершинино, Воронино, Губино, Дзержинское, Заречный, <b>Зональная Станция</b> , Зоркальцево, Калтай, Кандинка, Кафтанчиково, <b>Кижирово</b> , Козюлино, <b>Копылово</b> , Корнилово, Мазалово, Межениновка, Молодежный, Моряковский Затон, <b>Наумовка</b> , Новорождественское, Орловка, Петрово, Петухово, Рассвет, Рыбалово, Светлый, Тахтамышево, Тимирязево, <b>Томск</b> , Турунтаево, Черная Речка	Tb, Yb, Lu, <b>Eu</b> , Sm, <b>La</b>	Na, Fe, As, Cs, <b>La, Eu</b> , Hf, Th, U
Волосы детей	↘	↘	↘	–	–	Георгиевка, <b>Зональная станция</b> , Кижирово, Козюлино, <b>Копылово</b> , Моряковский Затон, Нелюбино, Орловка, Половинка, Рассвет, <b>Самусь</b> , <b>Северск</b> , <b>Томск</b> , <b>Черная речка (Юкса)</b>	<b>La</b> , Ce, Rb, <b>Ag</b> , Zn, Co	Na, <b>Co</b> , <b>Ag</b> , Sb, <b>La</b> , Hf <b>Ca, Zn</b>
Кровь человека	↘	–	–	–	–	<b>Наумовка</b> , <b>Северск</b> , <b>Черная речка (Юкса)</b>	Hf, Th, Ce, La	–

Объект исследования	Тенденция накопления элемента по мере удаления от зоны СПУ (< 30 км – > 30 км)					Населенные пункты, в которых содержания брома превышает среднеобластные значения	Значимые геохимические ассоциации брома (по результатам коэффициентов парной корреляции)	
	общая	сектора					до 2014 г	2014 г
		СВ	СЗ	ЮВ	ЮЗ			
Щитовидная железа	↘	–	–	–	–	Зональная Станция, Самусь	Se	–
Органы и ткани свиньи домашней	↘	–	–	–	–	Кижирово	U, Na	–

Примечание: жирным шрифтом обозначены населенные пункты, выделяющиеся по высоким уровням накопления элемента в нескольких объектах исследования, а также показаны идентичные геохимические ассоциации брома с химическими элементами, отмечающиеся в разные годы; красным цветом обозначены значимые отрицательные корреляционные связи брома.

Кроме того, проведенный анализ позволяет нам рассмотреть балансы распределения брома в пределах изучаемых сред в населенных пунктах северо-западного и северо-восточного секторов Томского района (рисунок 7.21), ввиду их значительной техногенной трансформации и высокой бромной напряженности.



**Рисунок 7.21** – Упрощенная схема распределения брома в окружающей среде Томского района (зона СПУ) в рамках круговорота элемента в природе, в мг/кг (для объектов литосферы – в мг/л)

*Примечание:* данные по пресным и подземным водам заимствованы из работы Колубаевой, 2015 (показан разброс минимально – максимальных значений в Томском районе области); твердый осадок снега (промышленные предприятия территории Западной Сибири) – по данным Шатилова, 2001.

Таким образом, отчетливо видно, что происходит максимальное накопление брома в живых организмах зоны СПУ. При этом наблюдается значительная дифференциация в накоплении элемента в данной зоне по сравнению с литературными данными и общими данными по Томской области. Так, содержания брома в волосах жителей, проживающих в зоне влияния СПУ более, чем в 9 раз выше содержаний элемента, отмечаемых в целом по Томской области (без учета данной зоны), и в 12,5 раз выше в крови жителей. Содержания брома в патологически измененных тканях щитовидной железы Томской области



характеризуются намного более высокими концентрациями элемента, чем данные литературных источников: они выше в 62 раза. Однако, они являются более низкими, чем максимальные уровни накопления, отмечаемые в щитовидной железе в целом по Томской области ввиду аномально высоких концентраций элемента в данном биосубстрате жителей Шегарского района области. Содержания брома в органах и тканях наземных животных зоны СПУ в 4 раза превышают его концентрации, характерные для Томской области, а для наземных растений – в 4,5 раза. Кроме того, повышенные уровни накопления элемента отмечаются также и для пресных вод района в сравнении с данными по фоновым территориям.

### 7.3 Геохимическая характеристика природных сред в районах расположения предприятий нефтеперерабатывающего комплекса

Ввиду того факта, что бром является специфичным элементом нефтехимической промышленности, в целях установления геохимической специфики природных сред вблизи расположения предприятий нефтеперерабатывающего комплекса, нами были изучены природные среды и биоматериалы, отобранные в районах расположения данного типа предприятий. Питьевые воды, почвы и листья тополя были отобраны в регионе Гранд-Эст во Франции в 2014 г., где расположен крупный нефтеперерабатывающий завод. Те же самые объекты исследования наряду с накипью питьевых вод и волосами детей были также отобраны в 2014 г. в нескольких населенных пунктах зоны СПУ Томского района области, в пределах которой находится крупнейший в России нефтехимический комбинат, а также ряд других разнопрофильных промышленных предприятий. Проведенный анализ полученной информации (по данным ICP – MS) показывает, что бром специфично и локально концентрируется в питьевых водах изученных территорий (таблица 7.5).

**Таблица 7.5** – Геохимический ряд химических элементов в питьевых водах в районах расположения нефтеперерабатывающих комплексов

Территория		Геохимический ряд химических элементов
Населенные пункты Томского района	Самусь	(Rb,In) <sub>1,8</sub> Ba <sub>1,6</sub> Sc <sub>1,4</sub> (Na Cu) <sub>1,3</sub> (Si,K,Sr) <sub>1,1</sub>
	Наумовка	Mn <sub>3,7</sub> B <sub>3</sub> Pb <sub>2,6</sub> Co <sub>2,4</sub> Fe <sub>2,1</sub> (Cu Zn) <sub>1,8</sub> Cr <sub>1,2</sub> (Ca Sc Rb,Sb) <sub>1,1</sub>
	Кузовлево	Sb <sub>1,5</sub> <b>Br</b> <sub>1,4</sub> Cu <sub>1,3</sub> (Ca Zn) <sub>1,2</sub> (Mg I) <sub>1,1</sub>
	Зональная станция	Sb <sub>1,5</sub> Co <sub>1,4</sub> (Ca,Li,Ba) <sub>1,3</sub> (Si,Sr) <sub>1,2</sub> (B,Na,Mg,Cr) <sub>1,1</sub>
	Копылово	U <sub>4,8</sub> Mo <sub>3,7</sub> Li <sub>2,3</sub> K <sub>1,8</sub> (Ti,Cs) <sub>1,7</sub> <b>Br</b> <sub>1,4</sub>
Франция	Регион Гранд - Эст	Al <sub>3,2</sub> I <sub>2,6</sub> <b>Br</b> <sub>2,3</sub> V <sub>1,7</sub> V <sub>1,5</sub> (Be,U) <sub>1,4</sub> (Na,Ti) <sub>1,3</sub> Ce <sub>1,2</sub> Fe <sub>1,1</sub>

Примечание: коэффициенты концентрации рассчитывались относительно среднего по выборке

Так, на территории Томского района в зоне влияния комбината по нефтепереработке «Сибур» бром встречается в питьевых водах населенных пунктов Кузовлево и Копылово. Первый из них находится в непосредственной близости к основным производствам, а второй является узловой станцией по транспортировке нефтепродуктов. Мы не беремся судить о путях попадания брома в питьевые воды и спектрах полученных элементов, которые концентрируются в них, однако данные предварительные результаты требуют дополнительного изучения в будущем, как с точки зрения природного фактора их формирования, так и техногенеза изучаемой территории.

Комплексный характер территории, подверженной воздействию предприятий Томск – Северской промышленной агломерации отражается в весьма широком спектре элементов, концентрирующихся в составе листьев тополей (таблица 7.6).

**Таблица 7.6** – Геохимический ряд химических элементов в листьях тополей в районах расположения нефтеперерабатывающих комплексов

Территория		Геохимический ряд химических элементов
Населенные пункты Томского района	Самусь	$\text{Sn}_5\text{Hg}_{1,8}(\text{B}, \text{Na}, \text{K})_{1,5}(\text{Ge}, \text{Sr}, \text{Au}, \text{Pb})_{1,4}(\text{Ba}, \text{W})_{1,3}(\text{Mg}, \text{Co}, \text{Si}, \text{Sb})_{1,2}$
	Наумовка	$\text{Be}_3(\text{Ni}, \text{Rb}, \text{Cd})_2\text{Zn}_{1,7}\text{Ag}_{1,6}(\text{Sm}, \text{Eu})_{1,5}(\text{Dy}, \text{Pr}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Br})_{1,4}$ $(\text{Cu}, \text{As}, \text{Y})_{1,3}(\text{Mn}, \text{Er}, \text{La}, \text{Ho}, \text{Nd}, \text{Yb})_{1,2}(\text{Ca}, \text{Cr}, \text{Co}, \text{Se}, \text{Cs}, \text{Ba}, \text{Lu}, \text{Hg})_{1,1}$
	Кузовлево	$(\text{Ce}, \text{Tl})_{1,7}\text{Be}_{1,6}(\text{Cd}, \text{Ge})_{1,5}\text{Tm}_{1,4}(\text{Eu}, \text{Gd}, \text{Y}, \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Tb}, \text{Ho}, \text{Er})_{1,3}$ $(\text{Mg}, \text{Sc}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Ba}, \text{Dy})_{1,2}(\text{P}, \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Sr}, \text{Sm}, \text{Yb})_{1,2}$
	Зональная станция	$\text{Se}_{2,2}\text{Br}_{1,9}\text{V}_{1,6}(\text{Ti}, \text{Sb}, \text{Bi})_{1,5}\text{W}_{1,4}(\text{Li}, \text{Zr}, \text{Pt}, \text{Th})_{1,3}(\text{Cr}, \text{Nb}, \text{U})_{1,2}$ $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ga}, \text{As}, \text{Pb})_{1,1}$
	Копылово	$\text{I}_4\text{Ta}_{3,2}\text{Mo}_{2,9}\text{Au}_{2,6}(\text{Al}, \text{Th})_{2,2}(\text{Li}, \text{Hf})_{2,1}(\text{Nb}, \text{V}, \text{Li}, \text{U})_{1,9}(\text{Cs}, \text{Ti})_{1,8}$ $(\text{Ga}, \text{Zr})_{1,7}(\text{Sc}, \text{Lu})_{1,5}\text{Na}_{1,4}(\text{P}, \text{Fe}, \text{Ce}, \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Yb}, \text{Er}, \text{Hg}, \text{Pt}, \text{Pb})_{1,2}$ $(\text{Cr}, \text{Nd}, \text{Ho}, \text{Tm}, \text{Gd}, \text{As})_{1,1}$
Франция	Регион Гранд - Эст	$\text{Br}_{22}\text{Na}_{19,7}\text{Zr}_{14,8}\text{Au}_6\text{Se}_5\text{Sb}_4\text{I}_{3,5}\text{Ta}_{3,2}\text{V}_{2,4}\text{U}_{2,3}(\text{Nb}, \text{Hf})_2(\text{Si}, \text{Ca})_{1,9}$ $(\text{Ti}, \text{P})_{1,6}\text{Fe}_{1,4}(\text{As}, \text{Ag}, \text{Tl})_{1,3}(\text{K}, \text{Zn}, \text{Pb})_{1,1}$

*Примечание: коэффициенты концентрации рассчитывались относительно среднего по выборке*

Населенный пункт Копылово характеризуется максимальным спектром элементов, накапливающихся выше среднего по выборке в листьях тополя, с коэффициентом концентрации брома равным 0,2. В целом, бром не относится к элементам, характерным для листвы деревьев данной территории, в то время как на территории Франции, в районе предприятия нефтепереработки, его концентрации достаточно велики и в 5 раз превышают среднее значение по выборке.

В почвах населенных пунктов Томского района, коэффициенты концентрации брома, превышающие 1, отмечаются только в пос. Зональная Станция (таблица 7.7), в котором наряду с н.п. Наумовка фиксируется максимальный спектр химических элементов.

Накопление значительного количества химических элементов характерно также и для почв Франции, в которых бром накапливается выше средних содержаний по выборке.

*Таблица 7.7 – Геохимический ряд химических элементов в почвах в районах расположения нефтеперерабатывающих комплексов*

Территория		Геохимический ряд химических элементов
Населенные пункты Томского района	Самусь	$Ru_{1,8}(Ca, Si)_{1,2}(Se, Pb)_{1,1}$
	Наумовка	$(Cs, Li, V)_{1,5}(Cr, Fe, Ni, As)_{1,4} (Mg, I, Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, W, Tl, Bi, Th, U)_{1,3} (Al, Co, Cu, Ga, Rb, Zr, Nb, Mo, La, Hf, Ta)_{1,2} (Ti, Sn, Ba)_{1,1}$
	Зональная станция	<b>Br</b> $_{1,9}(Na, I)_{1,4}Se_{1,3} (Mg, Ti, Mn, Co, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Dy, Er, Yb, Ta, Th)_{1,2} (Al, V, Cr, Fe, Ga, Sr, Y, Zr, Sn, Eu, Gd, Tb, Ho, Lu, Hf, W)_{1,1} (B, Na, Mg, Cr)_{1,1}$
	Копылово	$(Zn, P)_2Ag_{1,9}(Mn, Sb)_{1,4}(Ca, Cu, Sn)_{1,3}Sr_{1,2} (Ti, Ge, Se, Nb, Mo, Ta)_{1,1}$
Франция	Регион Гранд - Эст	$W_{5,7}I_2Hf_{1,8}(Ni, Zr)_{1,7}(Sn, La, Th)_{1,5}(Ce, Pb, U)_{1,4} (Ca, As, Se, Nb, Ag, Pr, Nd, Sm, Ta, Tl)_{1,3}(Cs, Br)_{1,2}(Li, Si, Ti, Rb, Y, Gd, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)_{1,1}$

*Примечание: коэффициенты концентрации рассчитывались относительно среднего по выборке*

Два следующих объекта исследования рассматриваются нами исключительно в пределах населенных пунктов Томского района. В накипи питьевых вод бром не был определен, однако, можно в целом проследить геохимический спектр элементов, характерный для данного объекта рассматриваемых населенных пунктов (таблица 7.8). Примечательно, что в накипи питьевых вод одного района отмечаются столь широкие различия в накоплении химических элементов.

*Таблица 7.8 – Геохимический ряд химических элементов в накипи питьевых в районах расположения нефтеперерабатывающих комплексов*

Территория		Геохимический ряд химических элементов
Населенные пункты Томского района	Самусь	$(W, Lu, Ti)_{3,2}Mo_{3,1}Ag_{2,9}(Li, Rb)_{2,5}Al_{2,4}(Si, Ni, Nd)_{2,3}Zr_{2,1}Eu_2Na_{1,9} (Mg, Nb, Sn, Pb)_{1,8}(Cu, Sm)_{1,7}(Ba, Er, Yb)_{1,6}Tl_{1,3}(P, Ge, Pr)_{1,2}(K, Th)_{1,1}$
	Наумовка	$Mn_{2,5}Nb_{2,1}Fe_{1,6}Er_{1,3}Ge_{1,2}Yb_{1,1}$
	Кузовлево	$Zn_{3,9}Pb_{2,5}Cu_{1,6}Cd_{1,3}Ge_{1,2}(Mg, Co)_{1,1}$
	Зональная станция	$Sr_{2,1}Ba_2Ag_{1,6}Ge_{1,5}Cu_{1,4}$
	Копылово	$U_{3,4}Cs_{3,3}(Sb, Cd)_{2,6}Se_{1,9}(Ni, Bi)_{1,7}Ga_{1,4}Nd_{1,3}(Sr, Th)_{1,2}(Ca, As)_{1,1}$

*Примечание: коэффициенты концентрации рассчитывались относительно среднего по выборке*

Иная картина отмечается при изучении геохимической специфики на примере волос детей, проживающих в населенных пунктах зоны влияния нефтехимического комбината (таблица 7.9). В данной зоне бром отмечается в населенных пунктах Самусь и Копылово. В последнем, бром накапливается также и в питьевых водах.

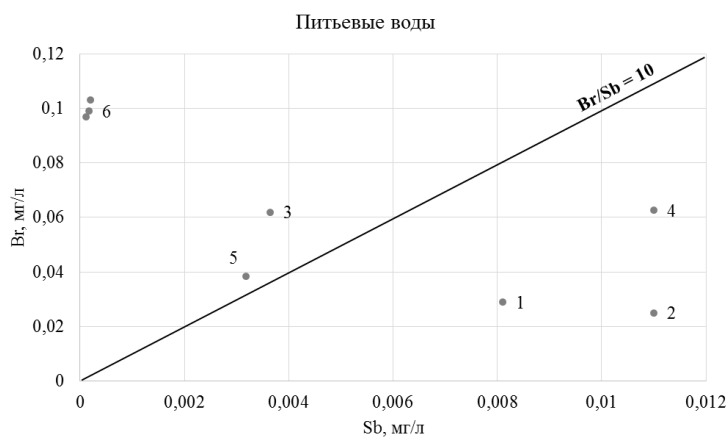
**Таблица 7.9 – Геохимический ряд химических элементов в волосах детей в районах расположения нефтеперерабатывающих комплексов**

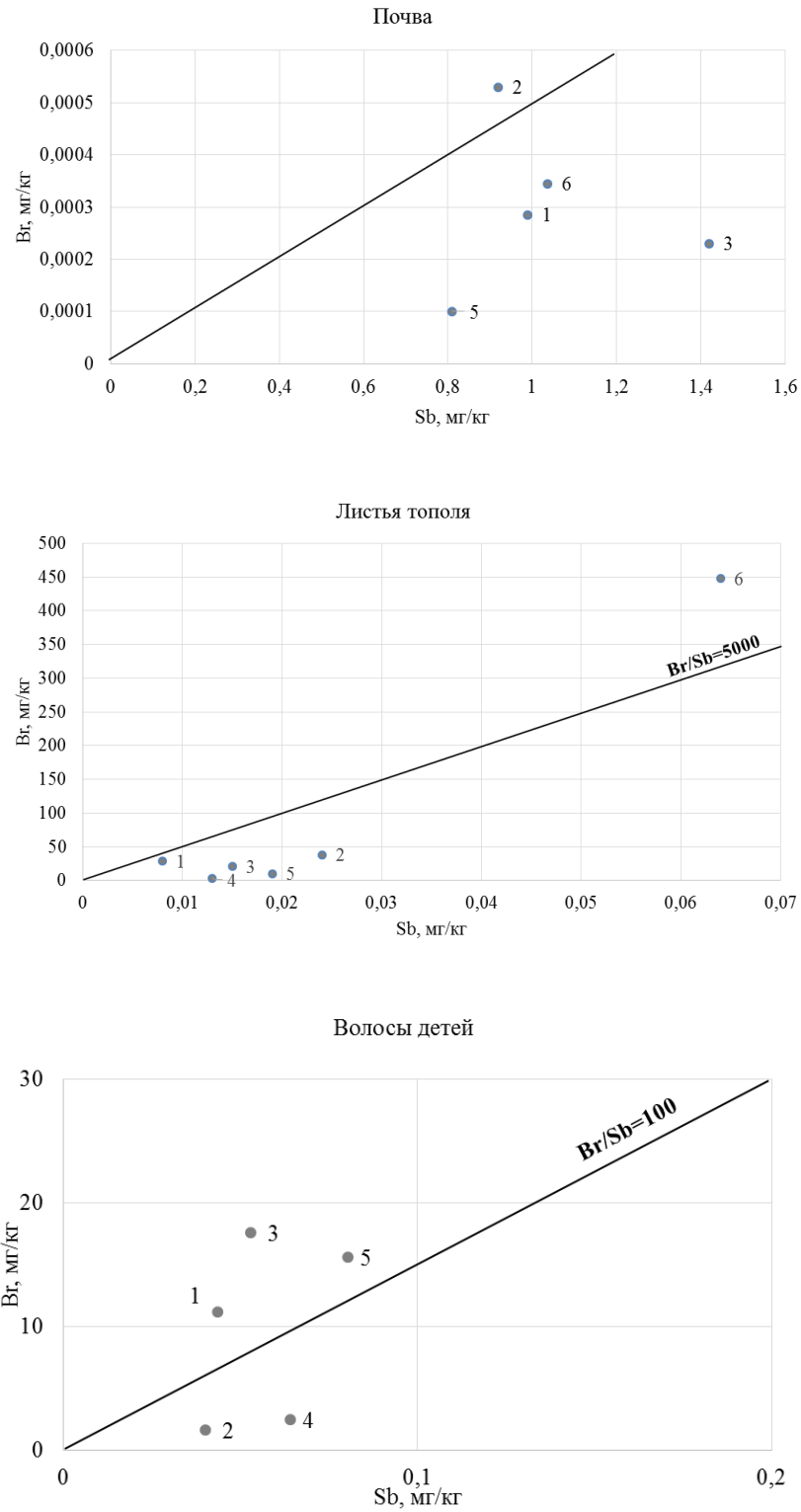
Территория		Геохимический ряд химических элементов
Населенные пункты Томского района	Самусь	(Na,La) <sub>1,6</sub> (Sc,Hg, <b>Br</b> ) <sub>1,4</sub> (V,Ce,Ag) <sub>1,5</sub> (Sb,Li,Rb,K,Tl,As,Cd) <sub>1,3</sub> (Mn,Ba,Pb) <sub>1,2</sub> (Co,Zn,Ge,Sr,Sm,Tb,Dy) <sub>1,1</sub>
	Наумовка	Pt <sub>2,1</sub> Ni <sub>1,7</sub> (Cr,I) <sub>1,6</sub> Yb <sub>1,5</sub> (P,Mo) <sub>1,4</sub> (Si,Ta) <sub>1,3</sub> (K,Rb,Nb,Lu) <sub>1,2</sub> (Mg,Ti,Fe,Sn,Cs,Eu,Bi) <sub>1,1</sub>
	Кузовлево	(Sm,Au) <sub>1,7</sub> I <sub>1,5</sub> (Cd,Ba,Nd,Gd) <sub>1,4</sub> (Al,Se) <sub>1,3</sub> (Mg,Ca,Cu,Zn,Sr,Nb, Sn,Pr,Dy,Ho,Pb,Th,Hf,Ta) <sub>1,2</sub> (Co,Cs,Eu,W,Hg) <sub>1,1</sub>
	Зональная станция	Ge <sub>2,9</sub> Li <sub>2,7</sub> Ca <sub>2,1</sub> As <sub>1,8</sub> Eu <sub>1,6</sub> Fe <sub>1,5</sub> (Al,Mg,Sc,Co,La,Ho) <sub>1,4</sub> (Ga,Sr,Zr) <sub>1,3</sub> (Si,Ti,Mn,Cs,Ce,Gd,Lu,Bi) <sub>1,2</sub> (Cu,Pr,Nd,Pt,Th) <sub>1,1</sub>
	Копылово	U <sub>9</sub> (Au,Hf <sub>2,1</sub> )Se <sub>2</sub> (Sn,Ag,Zr) <sub>1,7</sub> <b>Br</b> <sub>1,6</sub> Pb <sub>1,5</sub> (Na,As) <sub>1,3</sub> Lu <sub>1,2</sub> (V,I,Ta) <sub>1,1</sub>

Примечание: коэффициенты концентрации рассчитывались относительно среднего по выборке

Важное значение имеет также изучение геохимических индикаторных показателей в виде отношений химических элементов (Рихванов, 1997; Язиков, 2006). Так, например, специфичным индикаторным показателем, используемым для определения загрязнения атмосферы выхлопными газами от транспорта является Вг/Рb отношение, которое согласно теоретическим расчетам равно 0,386, так называемое этиловое отношение (Сагт и др., 1990). Нами также были рассмотрены некоторые новые отношения брома с химическими элементами (см. таблицу 7.10).

Согласно ряду исследований (Шатилов, 2001; Язиков, 2006; Барановская, 2011 и др.) специфичными элементами нефтехимической промышленности выступают сурьма и бром, что послужило отправной точкой для рассмотрения отношения Вг/Сb в природных средах и биоматериалах в районах расположения нефтеперерабатывающих комплексов (рисунок 7.22).





**Рисунок 7.22** – Отношения Br/Sb в природных средах и биоматериалах в районах расположения нефтеперерабатывающих комплексов

Примечание: 1 – Наумовка, 2 – Зональная станция, 3 – Копылово, 4 – Кузовлево, 5 – Самусь, 6 – Франция

Обобщение рассмотренных индикаторных показателей брома с химическими элементами в природных средах и биоматериалах представлено в таблице 7.10.

**Таблица 7.10** – Индикаторные показатели отношений брома с химическими элементами в природных средах в районах расположения нефтеперерабатывающих комплексов

Территория		Индикаторные отношения																			
		Na/Br				Br/Sb				Br/Pb				Br/U				Br/I			
		Питьевые воды	Почвы	Листья тополя	Волосы детей	Питьевые воды	Почвы	Листья тополя	Волосы детей	Питьевые воды	Почвы	Листья тополя	Волосы детей	Питьевые воды	Почвы	Листья тополя	Волосы детей	Питьевые воды	Почвы	Листья тополя	Волосы детей
Населенные пункты Томского района	Самусь	531	9*10 <sup>4</sup>	2,3	50	12	0,0001	542	195	14	4*10 <sup>-6</sup>	29	4	770	0,0001	3029	6308	2	5	1030	325
	Наумовка	362	3*10 <sup>4</sup>	0,2	28	4	0,0003	3588	257	4	2*10 <sup>-5</sup>	205	8	578	0,0002	12478	5185	5	4	28700	55
	Кузовлево	241	–	4,3	83	6	–	254	38	23	–	17	1	1252	–	1065	232	5	–	330	13
	Зональная станция	734	3*10 <sup>4</sup>	0,4	101	2	0,0006	1592	42	47	3*10 <sup>-5</sup>	136	1	500	0,0003	6702	234	3	7	2388	15
	Копылово	250	4*10 <sup>4</sup>	1,1	37	17	0,0003	1407	332	126	1*10 <sup>-5</sup>	68	3	15	0,0002	2453	80	9	6	117	129
Франция	Регион Гранд - Эст	193	3*10 <sup>4</sup>	0,7	–	866	0,0003	7000	–	485	4*10 <sup>-6</sup>	1600	–	92	0,0002	43077	–	4	3	2800	–
		201				576				495				76				4			
		220				518				515				82				3			

Как показывает анализ рисунка 7.22 и таблицы 7.10, по изменению Br/Sb отношения в питьевых водах, выделяются два населенных пункта Томского района: Копылово и Самусь, для которых показатель данного отношения равен больше 10. По показателю данного отношения в почвах выделяются с. Наумовка и Копылово, при значении отношения Br/Sb равным 0,0003, что также характерно и для почв территории Франции. Очень четко фиксируются различия по данному отношению при изучении листьев тополя, где населенные пункты Томского района обособляются в группу при изменении отношения от 254 до 3588, в то время как для территории Франции он составляет 7000. По изменению данного отношения в волосах детей, выделяется группа населенных пунктов – Наумовка, Копылово и Самусь, показатель отношения бром – сурьма в которых составляет больше 100.

Очень близкими отношениями Na/Br в питьевых водах характеризуются населенные пункты Кузовлево и Копылово, а также изучаемая территория Франции. По данному отношению в почвах обособленно выделяется пос. Самусь, с самыми высокими значениями Na/Br отношения. В питьевых водах и листьях тополя наибольшее Br/Pb отношение характерно для территории Франции, а наименьшее – для с. Наумовка. Однако, в последнем отмечается наибольшее бром – свинцовое отношение в волосах детей, проживающих в данном селе. Для питьевых вод населенных пунктов Томского района характерно Br/U отношение более 500, за исключением пос. Копылово. Данное отношение в почвах всех изучаемых территорий относительно стабильное, но при этом оно очень варьирует в листьях тополя. По Br/I отношению в питьевых водах выделяется пос. Копылово, в котором, однако, отмечается наименьшее значение этого отношения в листьях тополя. По данному отношению в волосах детей можно выделить населенные пункты Самусь и Копылово с самыми высокими значениями бром – йодного отношения.

*Таким образом, на примере изучаемых сред в районе расположения нефтехимического комбината на территории Франции отчетливо фиксируются высокие уровни накопления брома, что также отчетливо проявляется при изучении индикаторных показателей отношения брома с другими химическими элементами в разных средах. Это указывает на то, что бром является специфичным для данного производства химическим элементом. На территории Томского района данная специфика выражена очень слабо, что может быть связано с комплексным природно – техногенным характером территории, подверженной воздействию многочисленных предприятий Томск – Северской промышленной агломерации, что также отражается в повышенных концентрациях довольно широкого спектра химических элементов и нестабильностью индикаторных показателей отношения брома с ними.*

## ГЛАВА 8. ОЦЕНКА ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ БРОМА НА ЭКОСИСТЕМЫ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА ПОСРЕДСТВОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Высокая токсичность брома наряду с отрицательным его влиянием на живые организмы диктуют необходимость тщательного изучения токсического воздействия элемента на качество экосистем и здоровье человека. Для реализации данной цели нами была выбрана экологическая модель USEtox, преимущества которой подробно рассматривались в главе 3 данной работы, а основные методико-технологические аспекты – в главе 4.

Несмотря на наличие в базе данных модели информации по широкому перечню химических веществ (USEtox позволяет рассчитывать токсичность для более 3000 органических соединений и 25 неорганических элементов-металлов), бром в данную базу не включен. На основе совместной работы с авторами модели, нам удалось интегрировать элемент и изучить его потенциальное токсическое воздействие в рамках версии USEtox 2.02 и соответствующими ей методическими указаниями. Необходимо подчеркнуть, что рассматривалось исключительное не канцерогенное токсическое воздействие брома ввиду отсутствия необходимых данных по канцерогенности элемента.

Исходные данные для получения характеристического коэффициента токсичности брома (регистрационный номер CAS 7726–95–6) в компонентах окружающей среды представлены в таблице 8.1.

*Таблица 8.1 – Исходные данные, используемые для расчета характеристического коэффициента токсичности брома*

Параметр	Значение	Ссылка
Молярная масса, г/моль <sup>(8)</sup>	159,81	Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева
Коэффициент распределения октанол/вода, л/л	10,72	US Environmental..., 2010
Растворимость (при 25°C), мг/л	17110	Gandolini, 1999
Давление насыщенного пара (при 25°C), Па	28700	Lide, 1993
Коэффициент распределения между взвешенными твердыми частицами и водой, л/кг	5,5E+01	IAEA, 2010
Коэффициент распределения между осадочными частицами и водой, л/кг	5,5E+01	

<sup>(8)</sup> Так как молекула брома двухатомна, молярная масса учитывалась для Br<sub>2</sub>

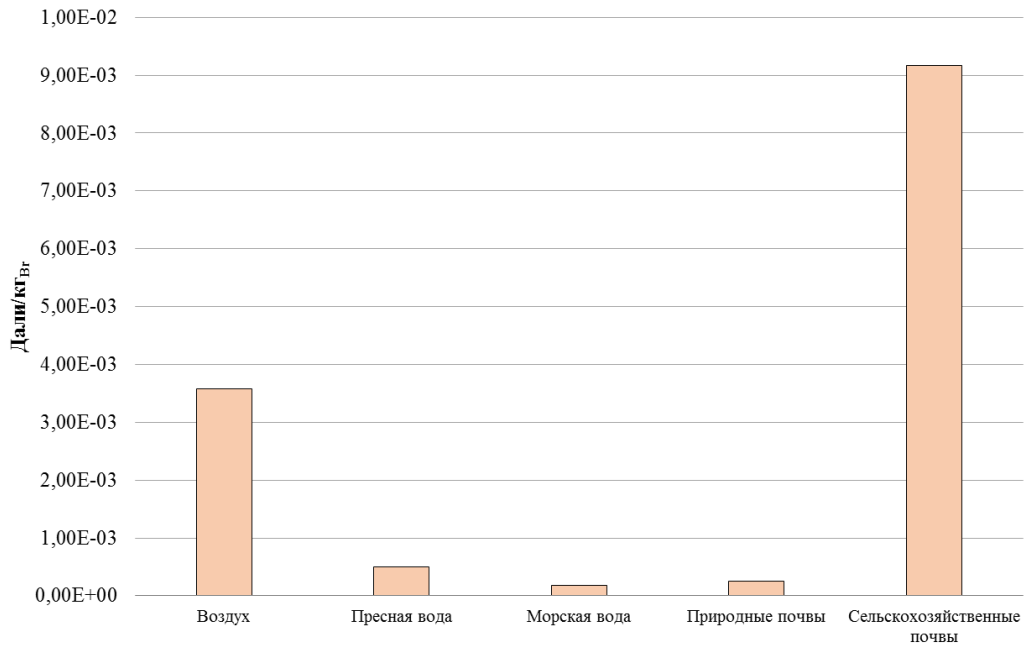


Продолжение таблицы 8.1

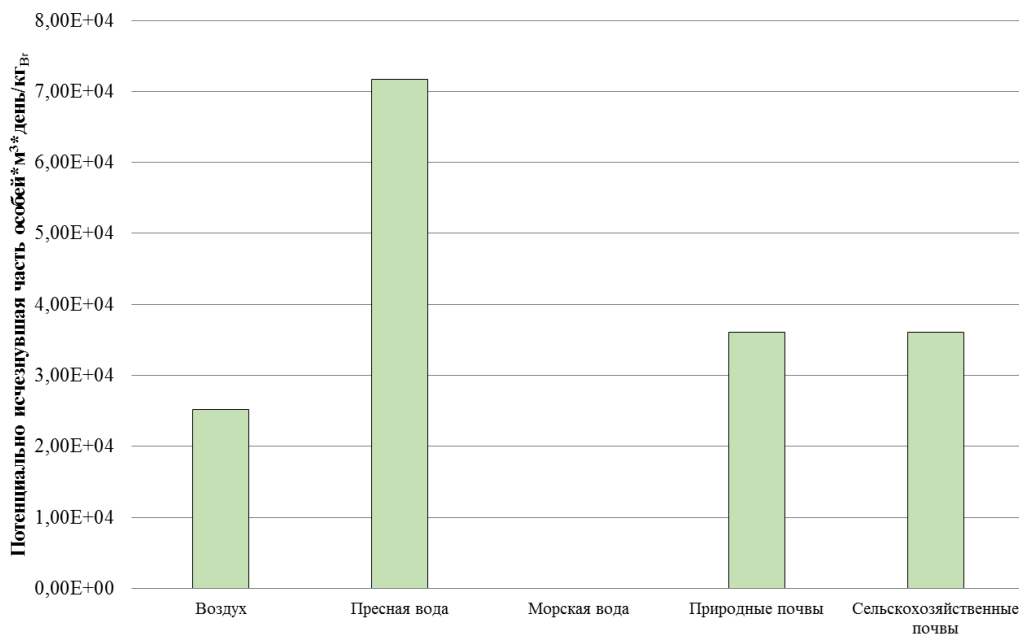
Коэффициент распределения между частицами почвы и водой, л/кг	5,5E+01	IAEA, 2010
Скорость деградации в воздухе, 1/с	1,7E-02	Fan, Jacob, 1992
Скорость деградации в воде, 1/с	1,0E-20	USEtox 2.02
Скорость деградации в осадках, 1/с	1,0E-20	
Скорость деградации в почве, 1/с	1,0E-20	
Коэффициент бионакопления в корнях растений, кг <sub>раст</sub> /кг <sub>почв</sub>	3,00E-01	US-EPA..., 2005
Коэффициент бионакопления в листьях растений, кг <sub>раст</sub> /кг <sub>почв</sub>	1,50E+00	
Коэффициент биоаккумуляции в рыбе, л/кг <sub>рыбы</sub>	1,60E+02	Kennedy, 1992
Среднее логзначение видоспецифической экотоксичности	-0.27	Учитывался один трофический уровень – <i>Daphnia magna</i> , расчет проводился согласно формуле 3.8 на основе данных US-EPA..., 2005
Доза (в эквиваленте на человека), которая с 50% вероятностью вызывает не канцерогенные заболевания при ингаляционном поступлении	5,80E-02	Расчет проводился согласно формуле 3.7 на основе данных ECHA, 2017
Доза (в эквиваленте на человека), которая с 50% вероятностью вызывает не канцерогенные заболевания при пероральном поступлении	3,93E+00	Расчет проводился согласно формуле 3.6 на основе данных Bromine..., 2009

Вычисленные с помощью модели характеристические коэффициенты токсичности брома для человека и экосистем (см. формулу 4.4) представлены на рисунках 8.1 и 8.2, соответственно. Данные коэффициенты представлены по умолчанию, т.е. показаны общие результаты, не учитывающие территориальных различий.

Как видно из рисунка, характеристические коэффициенты являются неодинаковыми в различных компонентах окружающей среды. Наибольшее внимание обращает на себя тот факт, что согласно результатам моделирования, бром является более токсичным для экосистем, которые, по-видимому, являются более чувствительными к действию элемента, чем для человека. Наибольшую опасность для них элемент представляет в пресной воде, а наименьшую в морской воде, при этом воздействие одинаково в почвах независимо от их типа. В противоположность токсичности брома для экосистем, наибольшую опасность для человека элемент представляет в почвах, используемых в сельскохозяйственных целях. Токсическое воздействие на здоровье человека элемент может также оказывать и при ингаляционном его поступлении. Бром в природных почвах и морской воде оказывает наименьшее воздействие на человека среди всех изученных компонентов окружающей среды.



**Рисунок 8.1** – Характеристические коэффициенты токсичности брома для человека, далы/кг<sub>Br</sub>



**Рисунок 8.2** – Характеристические коэффициенты токсичности брома для экосистем, потенциально исчезающая часть особей \* м³ \* день / кг<sub>Br</sub>

В целом можно заключить, что полученные в рамках моделирования результаты не противоречат литературной информации. Так, согласно моделированию, в морской воде для экосистем элемент практически не представляет опасности, что, на наш взгляд, является логичным, так как морские организмы способны накапливать повышенные концентрации элемента без каких-либо эффектов. То же самое можно заключить исходя из результатов по

токсичности брома для здоровья человека. Высокое токсическое воздействие, связанное с сельскохозяйственными почвами может быть связано с применением различного рода фумигантов, а воздействие, обусловленное поступлением брома ингаляционным путем, широко известен и находит отражение в нормативных документах.

### **8.1 Применение модели для оценки токсичности и экотоксичности брома в окружающей среде различных ландшафтно – географических зон**

Как уже отмечалось, отличительной особенностью модели является учет географической дифференциации территории. Вся территория земного шара в модели разделена на 8 континентальных или 17 субконтинентальных зон (Приложение Б), каждая из которых отличается специфическими климатическими, гидрологическими показателями, численностью населения, потреблением продуктов питания и мн.др. (*Kounina et al., 2014*). Соответственно, значения характеристического коэффициента токсичности для человека и экосистем в различных географических зонах могут различаться в широких пределах.

В контексте данной работы нами была рассмотрена также Томская область со своими характерными особенностями территории. Все исходные данные по Томской области, интегрированные в модель, представлены в таблице 8.2.

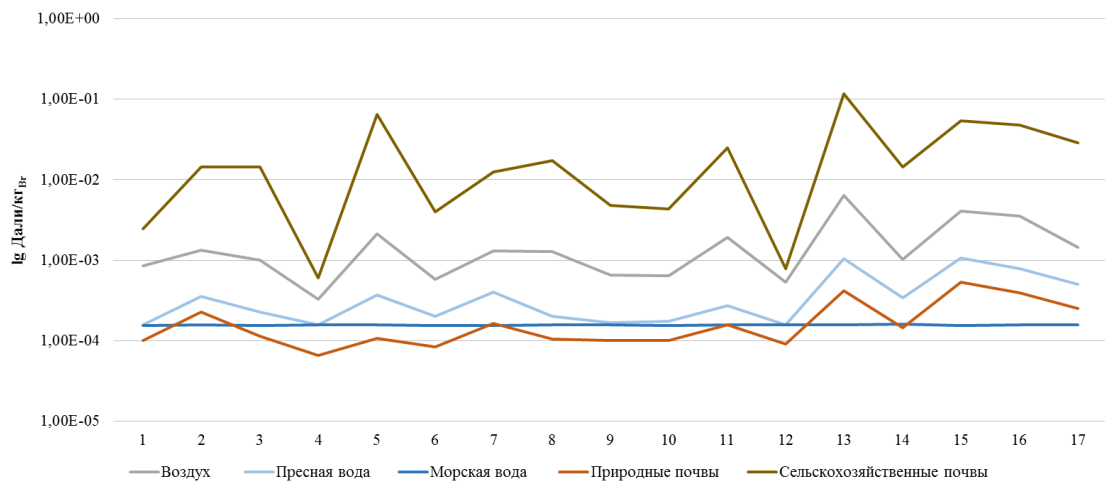
**Таблица 8.2 – Параметры, используемые для расчета характеристического коэффициента токсичности для территории Томской области**

<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>	<b>Ссылка</b>
Площадь территории, км <sup>2</sup>	3,14E+05	Территориальный орган..., 2017
Площадь морей, км <sup>2</sup>	1,37E+04	Рассчитывается в модели
Относительная доля пресных ресурсов	1,90E-02	Территориальный орган..., 2017
Относительная доля природных почв	9,37E-01	Территориальный орган..., 2017
Относительная доля сельскохозяйственных почв	4,40E-02	
Среднегодовая температура, °С	9,00E-01	Погода и климат, 2017
Скорость приземного ветра, м/с	1,60E+00	
Скоростью ветра на верхней границе слоя перемешивания, м/с	5,68E+02	USEtox 2.02
Среднегодовое количество осадков, мм/год	5,68E+02	Погода и климат, 2017
Эрозия почв, мм/год	3,00E-02	USEtox 2.02
Обводнение территории, км <sup>3</sup>	4,19E+00	Рассчитывается в модели
Общая численность населения	1,08E+06	Территориальный орган..., 2017
Численность городского населения (в среднем)	1,83E+05	

Продолжение таблицы 8.2

Потребление, кг в год на душу населения	Надземные с/х продукты (фрукты и др.)	3,62E-01	Федеральная служба..., 2017
	Подземные с/х продукты (картофель, морковь и др.)	6,77E-01	
	Мясо	1,67E-01	
	Молочные продукты	7,10E-01	
	Пресноводная рыба	3,07E-03	Федеральное агентство, 2017
	Морская рыба	4,60E-02	

Полученные результаты, представленные на рисунках 8.3 и 8.4<sup>(9)</sup> демонстрируют абсолютную неоднородность токсического воздействия брома в различных физико – географических условиях.



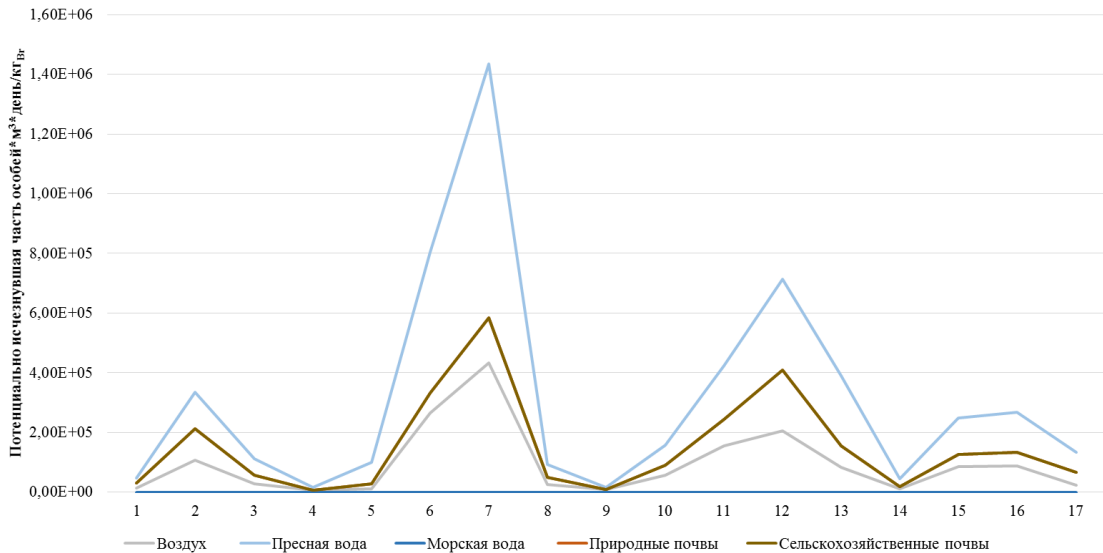
**Рисунок 8.3** – Характеристические коэффициенты токсичности брома для человека в разных географо-ландшафтных зонах, дали/кг·г

Наибольший риск для здоровья человека, обусловленный токсическим воздействием брома в воздухе, пресной воде, природных и сельскохозяйственных почвах проявляется в пределах Южной Австралии и Новой Зеландии, стран Европы, Индии, а также Восточного Китая. Наименьшее же воздействие отмечается в Северной Австралии, а также Северной Европе и Канаде, что обусловлено, прежде всего, значительными различиями в численности населения, проживающего на данных территориях, а также климатическими характеристиками (скорость

<sup>(9)</sup> Примечание: 1 – Томская область, 2 – Центральная Азия, 3 – Индокитай, 4 – Северная Австралия, 5 – Южная Австралия и Новая Зеландия, 6 – Южная Африка, 7 – Северная, Южная, Западная и Центральная Африка, 8 – Аргентина+, 9 – Бразилия+, 10 – Центральная Америка и Карибы, 11 – США и Южная Канада, 12 – Северная Европа и Северная Канада, 13 – Европа, 14 – Ост-Индия и страны Тихоокеанского региона, 15 – Индия, 16 – Восточный Китай, 17 – Япония и Корейский полуостров.

Перечень территорий, входящих в состав каждой зоны подробно представлен в приложении А.

ветра, количество осадков и др.). Можно также отметить, что, в целом на фоне рассматриваемых зон Томская область не отличается повышенным риском для здоровья человека, однако он является более высоким по отношению к таковому для жителей Северной Австралии, Северной Европы и Северной Канады и некоторых других.



**Рисунок 8.4** – Характеристические коэффициенты токсичности брома

для экосистем в разных географо-ландшафтных зонах, потенциально исчезнувшая часть особей \*м<sup>3</sup>\*день/кгBr

Абсолютно иная картина наблюдается при рассмотрении токсичности брома в пределах различных географических зон для экосистем. Наибольший риск для них отмечается во всех изучаемых объектах окружающей среды, за исключением морской воды, в Северной, Южной, Западной и Центральной Африке. Повышенный риск также наблюдается в США, Южной и Северной Канаде и Европе. Риск для экосистем Томской области можно охарактеризовать как один из самых минимальных, наряду с Северной Австралией, Бразилией, Ост-Индией и странами Тихоокеанского региона.

## 8.2 Применение модели для оценки токсичности и экотоксичности брома в почвах Томской области

Среди перечисленных компонентов окружающей среды, более пристальное внимание было обращено нами на почвы. Почва, будучи биокосным телом, представляет собой уникальное единение биотических и абиотических компонентов и является одним из важнейших объектов окружающей среды (Эколого–геохимические..., 2006; Perminova et al., 2016). Она характеризуется наличием сложных процессов, под воздействием которых происходит постоянная миграция попадающих в нее химических соединений, многие из которых могут быть

токсичными и потенциально опасными. Сама являясь серьезным акцептором загрязняющих веществ, почва может также выступать источником вторичного загрязнения атмосферы, поверхностных и подземных вод, а также живых организмов (*Эколого–геохимические...*, 2006).

Помимо исключительных случаев непосредственного употребления почвы в пищу (геофагия, случайное проглатывание детьми или некачественное промывание продуктов питания) (*Nunza et al.*, 2014), основными источниками поступления химических элементов из почв в организм человека являются трофические цепи. Почва выступает основным 'производителем' питательных веществ для растений, которые, в свою очередь, снабжают ими все высшие живые организмы, включая человека. Таким образом, химические соединения, поступающие в организм человека через пищевые цепи, берут свое начало из почв (*Brevik et al.*, 2015). Значительное количество работ посвящено вопросу роли почвы, как одного из факторов, способствующих возникновению заболеваний (*Рухванов и др.*, 1993; *Seneri et al.*, 1999; *Abrahams*, 2001; *Зубкова и др.*, 2013; *Brevik et al.*, 2015), что, несомненно, диктует необходимость тщательного изучения ее химического состава.

Ряд специфических особенностей Томской области (повышенная обводненность северной и центральной частей территории области, сильное влияние рельефа на почвообразование, обедненность карбонатами в пределах средней тайги и обогащенность в южной, суровый климат) способствуют формированию разнообразного почвенного покрова на ее территории. Почвы области являются, преимущественно, дерново–подзолистыми и торфяно–болотными, а в южной части – серыми лесными. Черноземы занимают наиболее дренированные территории юга Томского Приобья. Для почв области характерен повышенный гидроморфизм, большая часть почвенного покрова характеризуется низким естественным плодородием, почвы содержат мало гумуса (*Евсеева*, 2001).

Общая площадь земельного фонда Томской области составляет 31439,1 га, при этом основная часть территории представлена лесами – около 85%, доля сельскохозяйственных земель составляет чуть больше 8%, в том числе занято пашней около 2,1% территории (*Фузелла*, 2013; *Тенятникова*, 2016). Качество земель в области низкое, наиболее продуктивные земли расположены по долинам рек и в южной части области, где сельскохозяйственная освоенность земель варьирует от 18 до 45%, а в северных районах менее 1% (*Евсеева*, 2001). К основным сельскохозяйственным районам относятся Кожевниковский, Шегарский, Кривошеинский, Тегульдетский, Молчановский, Бакчарский, Томский, Асиновский и Зырянский. Стоит отметить, что в отношении брома почвы Томской области изучены крайне слабо (*Перминова и др.*, 2017), а информации о его влиянии на живые организмы через почвенные покровы отсутствует.

На примере почв Томской области мы наглядно продемонстрируем возможное использование модели с целью определения токсического воздействия на экосистемы и здоровье человека, а также выделения районов области по степени опасности для них. Результаты количественного определения брома в почвах Томской области методом ИНАА наряду с рассчитанными характеристическими коэффициентами токсичности брома для экосистем и человека в пределах Томской области, рассмотренные нами в предыдущем разделе, послужили основой расчетов общего показателя токсического воздействия (см. формулу 4.3). Стоит обратить внимание, что нами рассматривалось комплексное поступление элемента (ингаляционное и пероральное, совместно) через почвенные покровы в живые организмы.

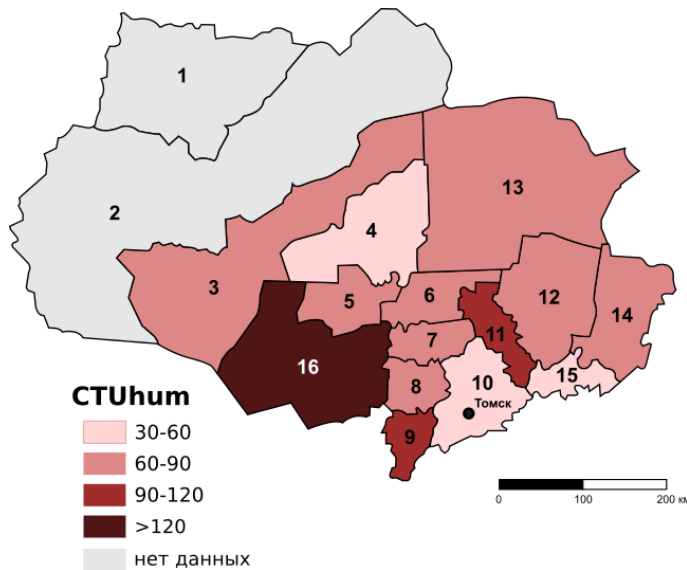
Необходимо подчеркнуть, что во всех районах области были отобраны почвы, используемые в сельскохозяйственных целях (в приусадебных хозяйствах населенных пунктов), в то время как в Томском районе области отбирались, преимущественно, природные почвы, расположенные вблизи промышленных предприятий. Кроме того, результаты ИНАА, представленные в мг/кг были пересчитаны в кг согласно формуле 4.9. Общие показатели токсического воздействия на экосистемы и здоровье человека, представлены в таблице 8.3.

**Таблица 8.3** – *Общий показатель токсичности для человека и экосистем Томской области*

Район	Концентрация брома в почвах, мг/кг (по результатам ИНАА)	Общий показатель токсичности	
		для человека, $STU_{hum}$	для экосистем, $STU_{eco}$
Парабельский	14.8	74.53	$9.3 \times 10^5$
Колпашевский	11.9	59.93	$7.5 \times 10^5$
Чаинский	15.3	77.05	$9.6 \times 10^5$
Молчановский	14.5	73.02	$9.1 \times 10^5$
Кривошеинский	16.8	84.61	$1.1 \times 10^6$
Шегарский	14.3	72.02	$9.0 \times 10^5$
Кожевниковский	18.1	91.15	$1.1 \times 10^6$
Томский	9.3	41.01	$1.2 \times 10^7$
Асиновский	19.7	99.21	$1.2 \times 10^6$
Первомайский	15.6	78.56	$9.8 \times 10^5$
Верхнекетский	13.6	68.49	$8.5 \times 10^5$
Тегульдетский	13.2	66.48	$8.3 \times 10^5$
Зырянский	10.8	54.39	$6.8 \times 10^5$
Бакчарский	39.4	198.42	$2.5 \times 10^6$
<i>Томская область</i>	<i>14.6</i>	<i>73.53</i>	<i><math>9.1 \times 10^5</math></i>

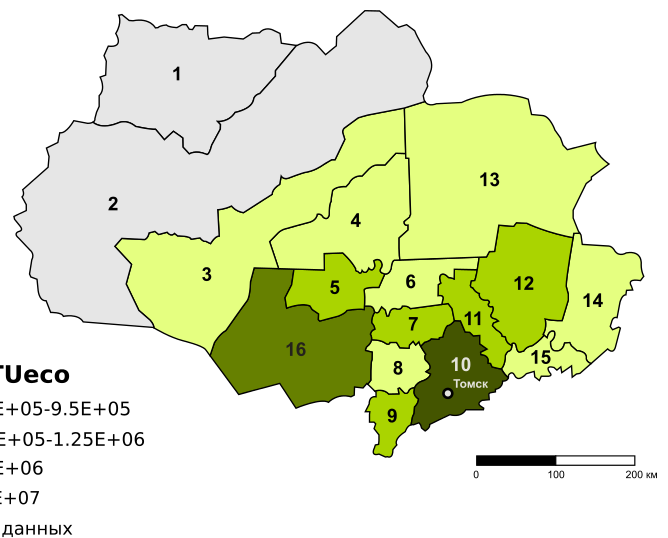
*Примечание:  $STU_{eco}$  – относительная единица токсичности для экосистем;  $STU_{hum}$  – относительная единица токсичности для здоровья человека.*

Для большей наглядности результаты общего показателя токсического воздействия брома, показанные в таблице 8.3, представлены также на рисунках 8.5 и 8.6<sup>(10)</sup>.



**Рисунок 8.5** – Общий показатель токсического воздействия брома на здоровье человека,  $STU_{hum}$

**Рисунок 8.6** – Общий показатель токсического воздействия брома на экосистемы,  $STU_{eco}$



Как показывает рисунок 8.5, минимальное токсическое воздействие брома на здоровье человека, обусловленное содержанием элемента в почвах, наблюдается в Колпашевском, Зырянском и Томском районах. Это обусловлено, в первую очередь, низкими концентрациями галогена в почвах. Кроме того, низкая опасность, отмечающаяся в последнем, связана с фактом отбора природных почв, а не сельскохозяйственных, как в других районах области. Повышенная опасность для здоровья людей отмечается в Кожевниковском и Асиновском районах, а самая высокая – в Бакcharском районе области, где отмечаются максимальные уровни накопления брома в почве.

Рисунок 8.6 демонстрирует, что токсическое воздействие брома на экосистемы значительно отличается от его воздействия на здоровье человека. Минимальный риск для

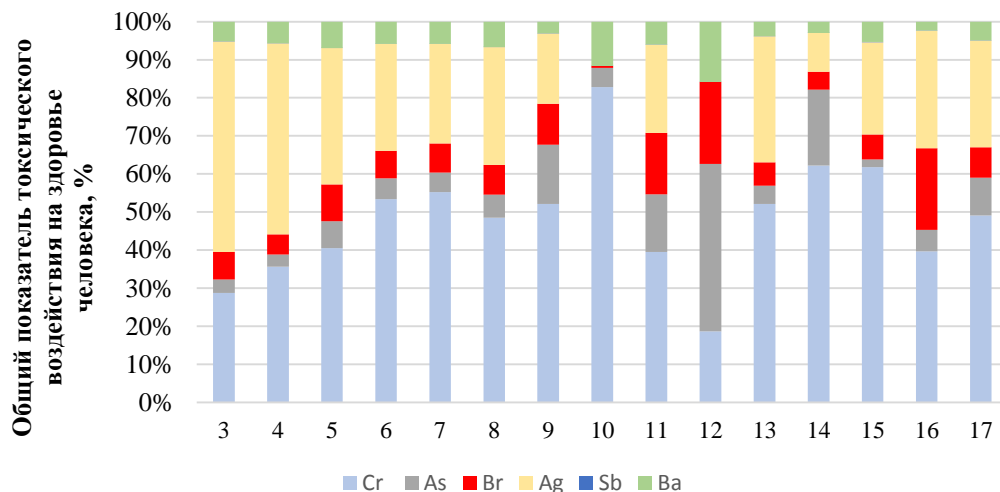
<sup>(10)</sup> Районы: 1 – Александровский, 2 – Каргасокский, 3 – Парабельский, 4 – Колпашевский, 5 – Чаинский, 6 – Молчановский, 7 – Кривошеинский, 8 – Шегарский, 9 – Кожевниковский, 10 – Томский, 11 – Асиновский, 12 – Первомайский, 13 – Верхнекетский, 14 – Тегульдетский, 15 – Зырянский, 16 – Бакcharский.



экосистем, обусловленный содержанием элемента в почвах фиксируется в ряде районов области: Парабельском, Колпашевском, Молчановском, Шегарском, Верхнекетском, Тегульдетском и Зырянском. В Бакчарском районе области, где отмечается максимальный риск для здоровья человека, риск для экосистем не является наибольшим. Кроме того, абсолютно противоположная картина характерна для Томского района области, в котором риск для здоровья человека является минимальным, а для экосистем – максимальным.

Несмотря на то, что в контексте одного химического элемента мы способны идентифицировать районы по степени риска для экосистем и человека, определив наименее и наиболее напряженные из них, мы не можем судить об опасности, которую может представлять бром ввиду отсутствия в модели USEtox каких-либо нормативов или оценочных шкал. Для того, чтобы понять представляет ли бром серьезную опасность ввиду своего токсического воздействия, нами также были рассмотрены и другие химические элементы, общие показатели токсичности для которых были рассчитаны подобно таковым для брома.

Нами были сопоставлены химические элементы, доступные в базе модели USEtox (25 металлов) с элементами, определенными методом ИНАА (26 элементов). Таким образом, для сравнения общего показателя токсичности брома на здоровье человека доступно 5 элементов: Cr, As, Ag, Sb и Ba, на состояние экосистем – 9 элементов: Cr, Fe, Co, As, Sr, Ag, Sb, Cs, Ba. Общие показатели токсического воздействия брома на здоровье человека и состояние экосистем представлены на рисунках 8.7 и 8.8 (в %) соответственно <sup>(11)</sup>.



**Рисунок 8.7** – Общий показатель токсического воздействия химических элементов на здоровье человека, %

<sup>(11)</sup> 1-16 – районы Томской области, см. примечание (4), 17 – среднее по Томской области.

Как видно из рисунка 8.7 наибольший вклад в токсическое воздействие на здоровье человека вносит не бром, а преимущественно, серебро, хром и мышьяк. Детальный вклад каждого отдельного элемента в общий показатель токсичности представлен в таблице 8.4.

*Таблица 8.4 – Вклад химических элементов в общий показатель токсического воздействия на здоровье человека*

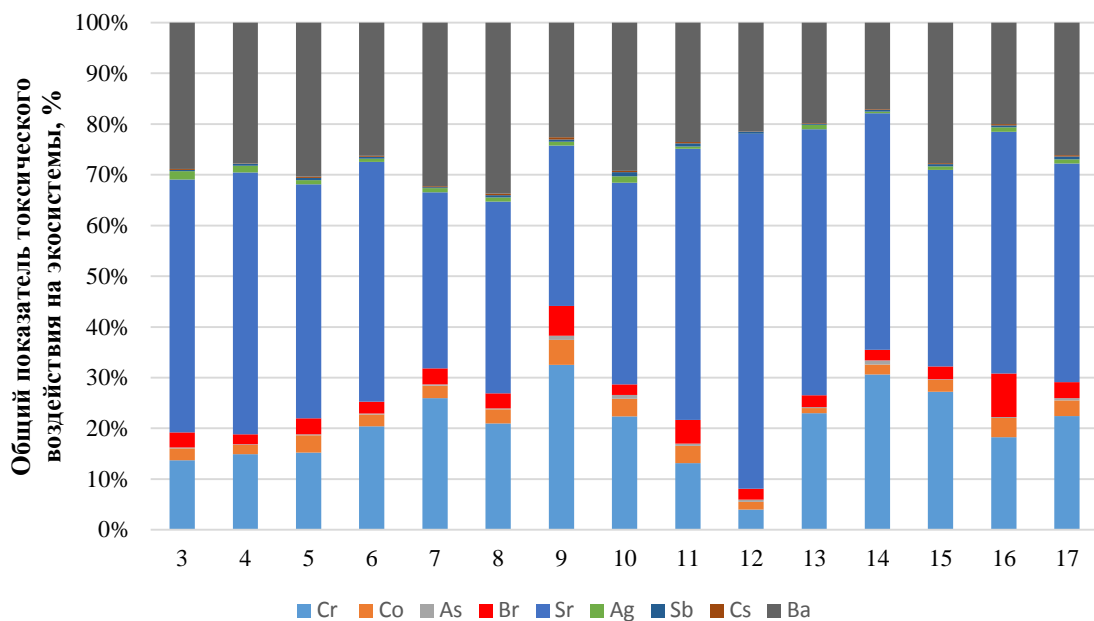
Район	Вклад элемента в общий показатель токсического воздействия на здоровье человека					
	Br	Cr	As	Ag	Sb	Ba
Парабельский	7,2%	28,7%	3,6%	55,3%	0,004%	5,2%
Колпашевский	5,3%	35,6%	3,3%	50,2%	0,006%	5,6%
Чаинский	9,7%	40,5%	7,0%	35,9%	0,009%	6,9%
Молчановский	7,2%	53,4%	5,5%	28,1%	0,008%	5,9%
Кривошеинский	7,7%	55,2%	5,1%	26,1%	0,004%	5,8%
Шегарский	7,8%	48,5%	6,0%	31,0%	0,008%	6,7%
Кожевниковский	10,8%	52,1%	15,5%	18,5%	0,006%	3,1%
Томский	0,5%	82,8%	5,0%	0,0%	0,016%	11,6%
Асиновский	16,1%	39,6%	15,1%	23,2%	0,015%	6,0%
Первомайский	21,6%	18,6%	44,0%	0,0%	0,029%	15,8%
Верхнекетский	6,1%	52,1%	4,8%	33,1%	0,003%	3,8%
Тегульдетский	4,7%	62,2%	19,9%	10,2%	0,006%	3,0%
Зырянский	6,6%	61,8%	2,0%	24,2%	0,008%	5,4%
Бакчарский	21,4%	39,7%	5,6%	30,9%	0,006%	2,3%

Наибольший вклад в токсическое воздействие на здоровье человека в Парабельском и Колпашевском районах области вносит серебро. Хром является основным элементом, вклад в токсичность которого является самым высоким по сравнению с другими элементами, и составляет от 39,6% до 82,8% в различных районах области. В Первомайском районе наибольшая токсичность отмечается вследствие высоких содержаний мышьяка в почвах.

Токсическое воздействие брома на здоровье человека в пределах различных районов области варьирует от 0,5% до 21,6%. В целом же, можно заключить, что токсическое воздействие брома на здоровье человека относительно других рассматриваемых химических элементов не является высоким. Примечательно, что в Бакчарском районе области, где обнаруживаются

максимальные уровни накопления брома в почвах, вклад элемента в общую токсичность не является доминирующим.

При изучении токсического воздействия брома на экосистемы было установлено, что железо является основным элементом, вносящим вклад в общую экотоксичность, варьируя от 69,4% до 91,8% в разных районах, что обусловлено высокими уровнями его накопления в почвах Томской области. Ввиду данного факта, общий показатель токсического воздействия химических элементов на экосистемы рассчитывался нами без учета железа для более объективной оценки (рисунок 8.8).



**Рисунок 8.8** – Общий показатель токсического воздействия химических элементов на экосистемы, %

Как видно из выше представленного рисунка, бром не является основным элементом, играющим первостепенную роль в общем показателе токсического воздействия на экосистемы. Элементами, вносящими высокий вклад в общую экотоксичность являются стронций, хром и барий. Вклад отдельных элементов в общий показатель токсичности для экосистем представлен в таблице 8.5.

Наибольший вклад в общую экотоксичность вносит стронций, варьируясь от 31,7% до 70,0% в разных районах. Вторым элементом, вносящим свою роль в токсическое воздействие на экосистемы является барий, доля которого в общей экотоксичности составляет 17,0% – 33,7%. Третьим элементом выступает хром, его значение в общей экотоксичности почв разных районов изменяется от 4% до 32,5%. Вклад брома изменяется от 1,9% до 8,6%, определяя тем самым его

четвертое место в общей экотоксичности среди изучаемых химических элементов. Средний вклад кобальта, серебра, сурьмы, мышьяка и цезия составляет 2,7%, 0,8%, 0,4%, 0,3% и 0,2% соответственно.

Как видно из таблицы 8.5 наиболее токсичными для экосистем являются содержания брома в почвах Бакчарского, а также Кожевниковского районов. Остальные районы области характеризуются относительной однородностью по показателю риска для экосистем, обусловленной токсическим воздействием брома.

*Таблица 8.5 – Вклад химических элементов в общий показатель токсического воздействия на экосистемы*

Район	Вклад элемента в общий показатель токсического воздействия на экосистемы							
	Br	Cr	Co	As	Ag	Sb	Cs	Ba
Парабельский	3,0%	13,7%	2,4%	0,1%	49,8%	1,7%	0,3%	0,2%
Колпашевский	1,9%	14,9%	1,8%	0,1%	51,7%	1,3%	0,4%	0,1%
Чаинский	3,2%	15,2%	3,4%	0,2%	46,1%	0,8%	0,4%	0,2%
Молчановский	2,4%	20,4%	2,4%	0,2%	47,2%	0,7%	0,4%	0,2%
Кривошеинский	3,2%	26,0%	2,5%	0,2%	34,8%	0,8%	0,3%	0,2%
Шегарский	2,9%	20,9%	2,8%	0,2%	37,8%	0,8%	0,4%	0,3%
Кожевниковский	5,9%	32,5%	4,9%	0,8%	31,7%	0,7%	0,5%	0,4%
Томский	2,1%	22,4%	3,5%	0,8%	39,7%	1,3%	0,8%	0,3%
Асиновский	4,7%	13,2%	3,4%	0,4%	53,5%	0,5%	0,6%	0,3%
Первомайский	2,2%	4,0%	1,5%	0,4%	70,0%	0,0%	0,4%	0,1%
Верхнекетский	2,3%	23,0%	1,0%	0,2%	52,5%	0,9%	0,2%	0,1%
Тегульдетский	2,0%	30,6%	2,0%	0,8%	46,7%	0,3%	0,4%	0,2%
Зырянский	2,5%	27,2%	2,3%	0,1%	38,8%	0,7%	0,4%	0,2%
Бакчарский	8,6%	18,2%	3,8%	0,2%	47,6%	0,9%	0,4%	0,3%

Долю брома в общем показателе экотоксичности можно охарактеризовать как среднюю. Элемент вносит относительно не большой вклад в общий показатель токсического воздействия на экосистемы, однако, согласно результатам моделирования, он является более опасным для них, чем, например, кобальт, серебро, сурьма, мышьяк и цезий.

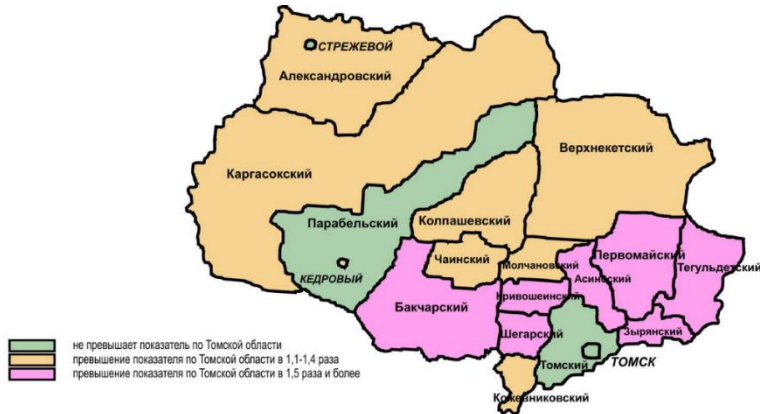
### **8.2.1 Оценка взаимосвязи между токсичностью брома в почвах и уровнем заболеваемости населения Томской области**

О взаимосвязях между бромом в окружающей среде и состоянием здоровья населения в Томской области известно крайне мало. В работе *О.А. Денисовой (2011)* показана связь между содержаниями брома в патологически измененной щитовидной железе и заболеваемостью диффузным не токсическим зобом. Однако, данные о взаимосвязях между бромом в почвах Томской области и здоровьем жителей данной территории отсутствуют. Таким образом, в рамках данного исследования нами впервые была осуществлена попытка устранить этот пробел, проанализировав результаты по токсичности брома в почвенных покровах, представленные в предыдущем разделе (рисунок 8.5), с имеющимися данными по заболеваемости населения Томской области. В качестве информации по заболеваемости использовались государственные доклады «О состоянии санитарно–эпидемиологического благополучия населения в Томской области, выполненные в период 2006–2015 гг.

Результаты исследований почв Томской области по санитарно–токсикологическим, бактериологическим и паразитологическим показателям показывают, что из 659 исследованных почв около 10% не отвечают гигиеническим нормам по содержанию санитарно–показательных микроорганизмов; 8,5% – по индексу бактерий группы кишечной палочки; 3,9% – индексу энтерококков. Из 647 исследованных почв, в 0,5% случаев были обнаружены яйца гельминтов (Александровский район, Томский район). Оценка степени эпидемиологической опасности почвенных покровов показывает, что 79,1% исследуемых территорий Томской области относятся к чистым; 12,2% являются умеренно опасными; 6,1% – опасными, а 2,6% – чрезвычайно опасными (*Доклад о санитарно–эпидемиологическом ..., 2012*).

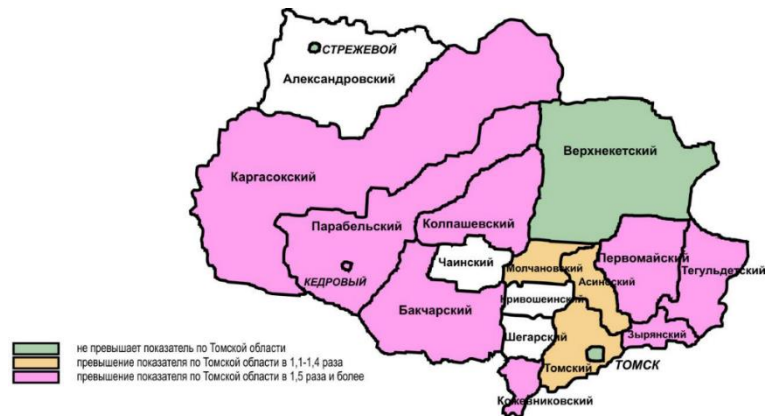
Анализ медико–биологических показателей здоровья населения Томской области показывает, что период с 2007 по 2011 гг. общая заболеваемость населения находилась на уровне  $1577,6 \pm 17,5$  (на 1000 населения) (*Доклад о санитарно–эпидемиологическом ..., 2012*). При этом уровень общей заболеваемости жителей выше, чем по Сибирскому федеральному округу, в целом. Значительный вклад в уровень общей заболеваемости населения Томской области вносят болезни органов дыхания и системы кровообращения, злокачественные новообразования, болезни органов пищеварения и дыхания, а также инфекционные и паразитарные болезни (*Доклад о санитарно–эпидемиологическом ..., 2016*).

В пределах области наиболее высокие уровни общей смертности населения зарегистрированы в семи районах (рисунок 8.9), а младенческой смертности – в восьми (рисунок 8.10).



*Рисунок 8.9 – Территории «риска» по общей смертности населения (О состоянии санитарно-эпидемиологического ..., 2016).*

*Рисунок 8.10 – Территории «риска» по младенческой смертности (О состоянии санитарно-эпидемиологического ..., 2016).*



Согласно данным Федерального информационного фонда социально-гигиенического мониторинга (ФИФ СГМ) в период 2012 – 2014 гг., Томская область включена в группу территорий «риска» по смертности населения от злокачественных образований <sup>(12)</sup> (рисунок 8.11):

- молочной железы – 12,9%;
- кожи – 11,6%
- органов дыхания – 10,6% (наиболее высокие уровни смертности наблюдаются в Верхнекетском, Кривошеинском, Парabelьском, Томском и Чаинском районах);
- щитовидной железы (превышение уровня Российской Федерации в 1,1 раза; в Бакчарском, Томском районах и г. Томске уровни смертности в 1,3-1,5 раза превышают показатель по Томской области);
- желудка – 6,7% (Доклад о санитарно-эпидемиологическом ..., 2012; 2016).

<sup>(12)</sup> В процентах показана доля заболеваемости



**Рисунок 8.11** – Территории «риска» по смертности населения от злокачественных новообразований (*О состоянии санитарно–эпидемиологического ...*, 2016).

Заболеваемость населения Томской области язвой желудка и 12-ти перстной кишки в 2014 г. по отдельным возрастным категориям находилась на следующих уровнях: дети (0-14 лет) – 19,4‰, подростки (15-17 лет) – 91,9‰, взрослые (18 лет и старше) – 105,6‰ (*О состоянии санитарно–эпидемиологического ...*, 2016). Пространственный анализ заболеваний язвой желудка и 12– перстной кишки детей, подростков и взрослого населения представлен на рисунке 8.12 (а, б, в, соответственно).



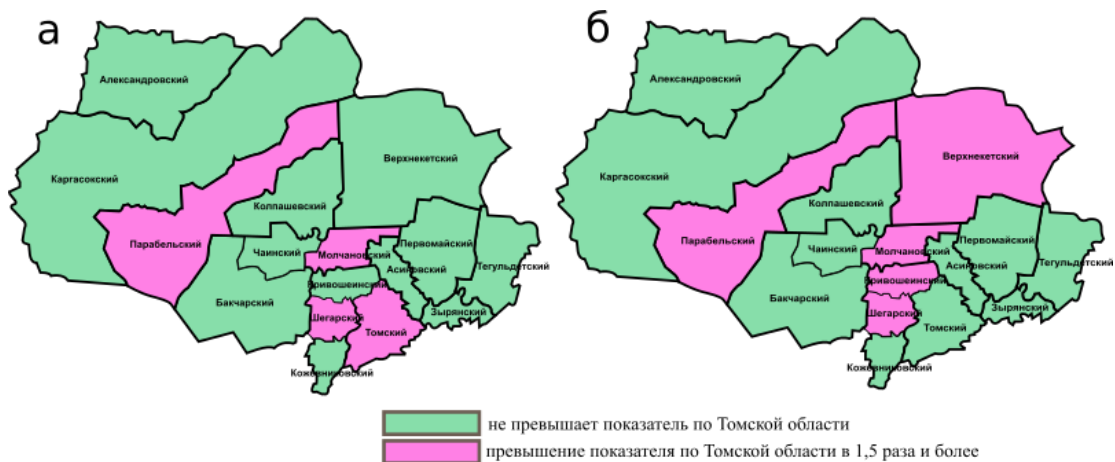
**Рисунок 8.12** – Территории «риска» по уровню заболеваемости язвой желудка и 12–ти перстной кишки среди: а – детей (0–14 лет), б – подростков (15–17 лет), в – взрослых (рисунок построен автором на основе данных «*О состоянии санитарно–эпидемиологического ...*», 2016).

Первичная заболеваемость населения гастритами и дуоденитами в 2014 г. находилась на следующих уровнях: дети (0–14 лет) – 1368,3 на 100 тыс. населения соответствующей возрастной группы, подростки (15–17 лет) – 1705,1‰, взрослые (18 лет и старше) – 394,5‰ (*О состоянии санитарно–эпидемиологического ...*, 2016). Пространственный анализ заболеваемости гастритом и дуоденитом среди детей, подростков и взрослого населения представлен на рисунке 8.13 (а, б, в, соответственно).



**Рисунок 8.13** – Территории «риска» по уровню заболеваемости гастритом и дуоденитом среди: а – детей (0–14 лет), б – подростков (15–17 лет), в – взрослых (рисунок построен автором на основе данных «О состоянии санитарно–эпидемиологического ...», 2016).

Отмечается, что в 2014 г. отмечается снижение первичной заболеваемости взрослого населения инсулиннезависимым и инсулинзависимым сахарным диабетом по сравнению с предыдущим годом. Территории «риска» по уровням первичной заболеваемости инсулиннезависимым и инсулинзависимым сахарным диабетом показаны на рисунке 8.14.

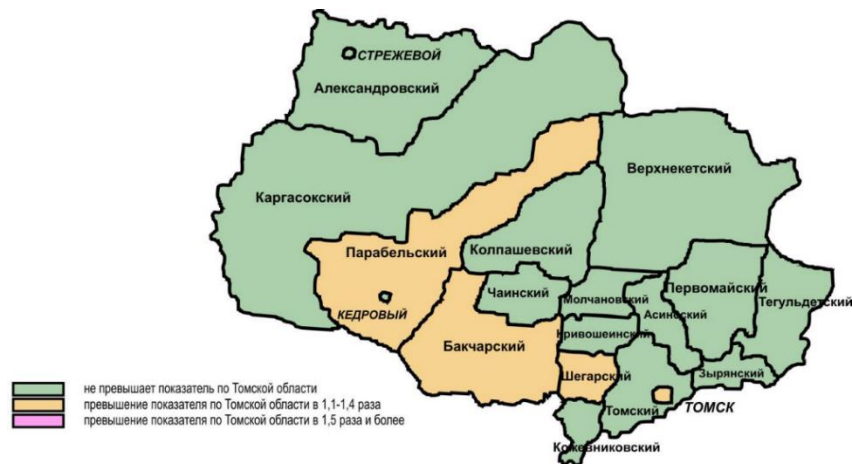


**Рисунок 8.14** – Территории «риска» по уровню первичной заболеваемости инсулиннезависимым (а) и инсулинзависимым (б) сахарным диабетом (рисунок построен автором на основе данных «О состоянии санитарно–эпидемиологического ...», 2016).

В структуре первичной заболеваемости населения Томской области, связанной с микронутриентной недостаточностью, значительная доля приходится на эндемический зоб и другие формы нетоксического зоба – 53%, на тиреоидит приходится 23%, на субклинический гипотиреоз – 19%, а тиреотоксикоз – 3%. При этом по данным ФИФ СГМ, Томская область включена в группы территорий «риска» по следующим нозологическим формам заболеваемости: дети – эндемический зоб, связанный с йодной недостаточностью (превышение среднероссийского уровня в 1,1–1,4 раза), синдром врожденной йодной недостаточности



(превышение среднероссийского уровня в 1,5 раза); подростки – те же формы заболеваемости, что и дети плюс другие формы нетоксического зоба, субклинический гипотиреоз, взрослые – эндемический зоб, связанный с йодной недостаточностью, а также субклинический гипотиреоз, тиреоидит (при превышении среднего уровня по России в 1,1–1,4 раза) (*О состоянии санитарно-эпидемиологического ...*, 2016). Группы «риска» по заболеваемости населения, связанной с микронутриентной недостаточностью представлены на рисунке 8.15.



**Рисунок 8.15** – Территории «риска» по заболеваемости населения, связанной с микронутриентной недостаточностью, с диагнозом, установленным впервые в жизни – ранжирование территорий по среднемноголетнему показателю (2012-2014 гг.) (*О состоянии санитарно-эпидемиологического ...*, 2016).

Анализ данных по заболеваемости населения Томской области мочекаменной болезнью демонстрирует значительное количество районов области, относящихся к группам «риска» (рисунок 8.16).



**Рисунок 8.16** – Территории «риска» по заболеваемости населения мочекаменной болезнью с диагнозом, установленным впервые в жизни (*О состоянии санитарно-эпидемиологического ...*, 2016).

Особый интерес представляет ранжирование административных районов Томской области по величине интегрального показателя здоровья. Как следует из рисунка 8.16а, в группе повышенного риска возникновения нарушений в здоровье детского населения отмечаются 8 районов области, а в здоровье взрослого населения – 4 административных районов области в зоне высокого риска (рисунок 8.17б).



**Рисунок 8.17** – Территории «риска» по величине интегрального показателя здоровья: а – детского населения (до 14 лет), б – взрослого населения (от 18 лет и старше) (рисунок построен автором на основе данных «О состоянии санитарно-эпидемиологического ...», 2006).

Сопоставление представленных карт «риска» Томской области по различным видам заболеваемости с полученными данными по токсическому воздействию на здоровье человека, обусловленному содержанием брома в почвах, позволяет нам сделать некоторые заключения. Прежде всего стоит отметить, что ни одна карта по заболеваемости Томской области на 100% не совпадает с полученными результатами по общему показателю токсического воздействия брома на здоровье человека (рисунок 8.5). В наибольшей степени схожесть между картами по заболеваемости и токсичности брома фиксируется на рисунке 8.9, отражающем территории «риска» по общей смертности населения. Здесь максимальные показатели смертности отмечаются в Бакчарском и Асиновском районах области, а минимальные – в Томском районе, при этом Чаинский, Молчановский и Верхнекетский районы характеризуются средним уровнем риска. Абсолютно идентичная картина наблюдается при рассмотрении общего показателя токсического воздействия брома на здоровье человека, обусловленного его нахождением в почвенных покровах.

Высокий уровень младенческой смертности находит отражение в сопоставлении с высокой токсичностью брома в Кожевниковском и Бакчарском районах, а также в высоком риске по величине интегрального показателя здоровья взрослого населения и высоком уровне заболеваемости язвой желудка, 12-ти перстной кишки, гастритом и дуоденитом среди детей для

последнего. Кроме того, низкий уровень заболеваемости населения язвой желудка и 12-ти перстной кишки, инсулинзависимым сахарным диабетом и заболеваниями, связанными с микронутриентной недостаточностью в Томской и Зырянском районах находит отражение в низком показателе токсического воздействия брома на здоровье человека на данных территориях.

*Таким образом, использование модели USEtox позволило изучить токсическое воздействие брома на живые организмы как в целом, так и в пределах различных географо-климатических условий. Последнее представляет особый интерес в рамках геоэкологических исследований. В основу модели положены принципы методологии оценки риска, учитываются данные лабораторных исследований, важнейшие физико-химические параметры элементов, особенности их биоаккумуляции и многие другие, что, несомненно, указывает на актуальность ее использования в рамках оценки рисков для живых организмов. Полученные в ходе моделирования результаты демонстрируют, что токсическое воздействие брома на экосистемы значительно выше, чем на здоровье человека. При этом оно существенно различается в зависимости от компонента окружающей среды, в котором находится элемент (почва, воздух и т.д.). Максимальный риск для человека бром представляет в сельскохозяйственных почвах и воздухе, в то время как для экосистем – в пресной воде. Кроме того, воздействие брома на живые организмы в различных ландшафтно – географических зонах варьируется в широких пределах.*

*Применение модели для оценки токсичности и экотоксичности элемента в почвах Томской области позволило нам идентифицировать районы Томской области по риску для экосистем и здоровья человека. Одним из недостатков модели является отсутствие оценочной шкалы, указывающий на минимально-максимальные уровни элементов, которые способны быть опасными для живых организмов. Данный недостаток был компенсирован нами сравнением полученных результатов с другими химическими элементами, определенными методом ИНАА и доступными в модели. Как показывают результаты, риск, связанный с присутствием брома в почвах Томской области, является относительно низким, как для человека, так и для экосистем.*

*Несмотря на то, что какие-либо нормативы для брома в почвах отсутствуют, а основные принципы модели в некоторой степени схожи с принципами санитарно – гигиенических нормативов, результаты модели не могут заменять нормативные показатели. Полученные результаты по токсическому воздействию на здоровье человека, обусловленному содержанием брома в почвах, сопоставленные с картами заболеваемости населения Томской области, не демонстрирует абсолютно идентичных закономерностей. Однако фиксируется значительная схожесть между токсическим воздействием брома на здоровье и общей смертностью населения. Кроме того, низкие/высокие уровни токсичности брома в почвах находят отражение в минимальном/максимальном риске некоторых видов заболеваемости в отдельных районах области.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- Проведен литературный обзор по геоэкологическим аспектам накопления и распределения брома в природно – техногенных ландшафтах;
- Определено количественное содержание элемента в различных компонентах природной среды на территории Томской области и осуществлен анализ полученных результатов с данными по другим регионами России и зарубежья, а также литературными показателями;
- Проведен анализ пространственно – временного распределения брома на исследуемой территории с обозначением локальных участков, характеризующихся повышенными содержаниями элемента, обусловленными природно – техногенными факторами;
- Проведено ранжирование территории Томской области в соответствии с минимально – максимальным концентрированием элемента в компонентах природной среды;
- Установлены индикаторные показатели отношений брома с химическими элементами в районах расположения промышленных предприятий;
- Выполнены расчеты характеристических коэффициентов токсичности брома для компонентов природной среды в целях последующего их введения и использования в модели USEtox;
- Оценено токсическое воздействие брома для экосистем и человека на примере почв Томской области, с учетом ее ландшафтно-географических характеристик, и проведено сопоставление с данными по заболеваемости населения Томской области;
- Проведено ранжирование территории региона по степени опасности для экосистем и здоровья населения.

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

**ВДК** – Временно – допустимая концентрация

**ВОЗ** – Всемирная организация здравоохранения

**ИНАА** – Инструментальный нейтронно-активационный анализ

**МАГАТЭ** – Международное агентство по атомной энергии

**ОБУВ** – Ориентировочный безопасный уровень воздействия

**ОВОС** – Оценка воздействия на окружающую среду

**ОДК** – Ориентировочно – допустимая концентрация

**ОДУ** – Ориентировочно – допустимый уровень

**ОС** – Окружающая среда

**ПДВ** – Предельно – допустимый выброс

**ПДК** – Предельно – допустимая концентрация

**ПДС** – Предельно – допустимые сбросы

**ПДУ** – Предельно – допустимый уровень

**РФА** – Рентгенофлуоресцентный анализ

**СЭМ** – Система экологического менеджмента (глава 2)

**СЭМ** – Сканирующая электронная микроскопия

**СЭО** – Стратегическая экологическая оценка

**ФИФ СГМ** – Федеральный информационный фонд социально-гигиенического мониторинга

**ЯГЛ** – Ядерно–геохимическая лаборатория

**ICP-MS** – масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой

**Бромизм** – хроническая интоксикация бром содержащими лекарственными препаратами.

**Бромодерма** – заболевание кожи, развивающееся в результате длительного приема препаратов брома.

**Временно – допустимая концентрация** – максимальное количество загрязняющих веществ в единице объема сточных вод абонента, временно разрешенное к сбросу в системы канализации населенного пункта в составе временных условий приема загрязняющих веществ.

**Гемодиализ** – метод внепочечного очищения крови при острой и хронической почечной недостаточности.

**Диффузный нетоксический зоб** – аутоиммунное заболевание, обусловленное избыточной секрецией тиреоидных гормонов диффузной тканью щитовидной железы, сопровождающееся развитием тиреотоксикоза.

**Дилатационная кардиомиопатия** – первичное поражение миокарда, которое характеризуется растяжением (дилатацией) полостей сердца, с возникновением систолической дисфункции желудочков (преимущественно левого), но без увеличения толщины стенок.

**ЛК50** (или средняя летальная концентрация) – стандартный показатель токсичности окружающей среды, в которой погибнет половина исследуемой группы организмов определенного вида за определенный период времени при ингаляционном воздействии.

**ЛД50** (полуметальная или средняя смертельная доза) – средняя доза вещества, вызывающая гибель половины членов испытываемой группы.

**Миокардоз** – заболевание сердечной мышцы не воспалительного характера, сопровождающееся дистрофическими изменениями в миокарде и нарушением в нем биоэнергетических и обменных процессов.

**Ориентировочный безопасный уровень воздействия** – временный гигиенический норматив для загрязняющего атмосферу вещества, устанавливаемый расчетным методом для целей проектирования промышленных объектов.

**Ориентировочно – допустимая концентрация** – гигиенический норматив, характеризующий ориентировочную допустимую концентрацию вещества.

**Ориентировочно – допустимый уровень** – временный гигиенический норматив, разрабатываемый на основе расчетных и экспресс-экспериментальных методов прогноза токсичности и применяемый только на стадии предупредительного санитарного надзора за проектируемыми или строящимися предприятиями, реконструируемыми очистными сооружениями.

**Острая токсичность** – токсическое действие вещества, введенного в однократной дозе или в многократных дозах в течение не более 24 ч.

**Перитонеальный диализ** – метод очищения крови от эндогенных и экзогенных токсинов с одновременной коррекцией водно-солевого баланса путем диффузии и фильтрации растворов веществ через брюшину как естественную полупроницаемую мембрану.

**Предельно – допустимый выброс** – норматив, который устанавливается для стационарного источника загрязнения атмосферного воздуха с учетом технических нормативов выбросов и фонового загрязнения атмосферного воздуха при условии не превышения данным источником гигиенических и экологических нормативов качества атмосферного воздуха, предельно допустимых (критических) нагрузок на экологические системы, а также других экологических нормативов.

**Предельно – допустимая концентрация** – концентрация, которая при ежедневной работе в течение 8 ч и не более 40 ч в неделю, в течение всего рабочего стажа не должны вызывать

заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

**Предельно – допустимый сброс** – объём сточных вод, отводимых в водоём в единицу времени, который с учётом разбавления его водой водоприёмника создаёт в контрольном пункте концентрацию загрязняющего вещества не выше предусмотренной нормы.

**Предельно – допустимый уровень** – законодательно утверждённая верхняя граница величины некоего воздействующего фактора (шум, радиоактивность, напряжённость электромагнитного поля, концентрация веществ и т. д.), которая допускается при той или иной человеческой деятельности, как не приводящая к травмам или другим повреждениям организма.

**Серповидноклеточная анемия** – наследственное заболевание системы крови, характеризующееся генетическим дефектом, в результате которого нарушается образование нормальных цепей гемоглобина в эритроцитах.

**Тиреотоксикоз** – патологическое состояние, которое прогрессирует вследствие повышения уровня гормонов, продуцируемых щитовидной железой.

**Уремия** – синдром острой или хронической аутоинтоксикации, развивающийся при выраженной почечной недостаточности в результате задержки в организме азотистых метаболитов и других токсических веществ, расстройства водно-солевого, кислотно-щелочного и осмотического гомеостаза, сопровождающийся вторичными обменными и гормональными нарушениями, общей дистрофией тканей и дисфункцией всех органов и систем.

**Фторбромфреоны** – органические соединения, способствующие разрушению озонового слоя.

**Хроническая токсичность** – это совокупность токсических эффектов, вызываемых повторным введением того или иного токсического вещества в одинаковой дозе, в течение периода, обычно соответствующего большей части жизни мало живущих видов лабораторных животных.

**ЭД50** (полуэффективная доза) – доза вещества, которая обеспечивает требуемый результат у половины (50%) используемых в эксперименте единиц: людей, животных и др.

**ЕС50** (полумаксимальная эффективная концентрация) – концентрация лиганда (атом, ион ли молекула, связанные с акцептором), которая вызывает эффект, равный половине максимального возможного для данного лиганда после истечения некоторого промежутка времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов, А. И. Математическое моделирование водных экосистем: история, проблемы, перспективы / А.И. Абакумов // Биологические ресурсы и сырьевая база рыболовства. – Владивосток: ТИНРО, 2006 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tinro.ru/models/pdfs/WatEcoRev.pdf> (дата обращения 02.03.2017).
2. Абдуллин, А. Г. Жизнедеятельность человека в экологически неблагоприятных условиях существования / А. Г. Абдуллин, Н. А. Антипанова, Д. Г. Абдуллина // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – №7. – С. 5–9.
3. Авцын, А.П. Введение в географическую патологию / А.П. Авцын. – М.: Медицина, 1972. – 328 с.
4. Авцын, А.П. Микроэлементозы человека / А.П. Авцын, А.А. Жаворонков, М.А. Риш и др. – М.: Медицина, 1991. – 496 с.
5. Айвазян, С.А. Измерение синтетических категорий качества жизни населения региона и выявление ключевых направлений совершенствования социально-экономической политики (на примере Самарской области и ее муниципальных образований) / С.А. Айвазян, В.С. Степанов, М.И. Козлова // Прикладная эконометрика. – 2006. – №2. – С. 326–335.
6. Александрова, Т.Д. Экологическое нормирование антропогенно-техногенных нагрузок на ландшафты / Т.Д. Александрова // Методология экологического нормирования: Тезисы докладов Всесоюз. конф. – Харьков, 1990. – С. 5.
7. Алексеенко, В. А. Экологическая геохимия: Учебник / В. А. Алексеенко. – М.: Логос, 2000. – 627 с.
8. Алексеенко, В. А. Эколого-геохимические изменения в биосфере. Развитие, оценка: монография / В.А. Алексеенко. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 520 с.
9. Арбузова, Т.П. Микроэлементы-галогены и их соединения как загрязнители окружающей среды. Риск для здоровья населения (обзор литературы) / Т.П. Арбузова, О.М. Пастухова, В.А. Демаков // ЗДОРОВЬЕ СЕМЬИ - 21 ВЕК. – 2013. – №4. – С. 1–20.
10. Архангельская, Т. А. Ретроспективная оценка радиоэкологической ситуации по результатам исследования годовых колец срезов деревьев: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.36 / Архангельская Татьяна Алексеевна. – Томск, 2004. – 25 с.
11. Архангельский, В.В. Уран, торий и редкоземельные элементы как индикаторы антропогенного воздействия на почвы юга Томской области / В.В. Архангельский, Л.П. Рихванов // Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства. Гидрогеология и инженерная геология. Геоэкология и мониторинг геологической среды: Материалы Международной научно–практической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2001. – С. 124 – 127.



12. Арынова, Ш.Ж. Элементный состав солевых образований из природных пресных вод как индикатор экологической безопасности водопользования: дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.36 / Арынова Шынар Жаныбековна. – Томск, 2016. – 151 с.
13. Ассоциация микроэлементов с органическим веществом в осадочных толщах Сибири / ред. В.А. Кузнецов и др.; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т геологии и геофизики // Сборник научных трудов. – Новосибирск, 1984. – 157 с.
14. Атлас «Окружающая среда и здоровье населения России» / под. ред. М. Фешбах. – М.: Паимс, 1995. – 448 с.
15. Бакиев, С.А. Закономерности формирования промышленных йодных вод Узбекистана и перспективы их использования: автореф. дис. ... д-ра. геол.-мин. наук: 04.00.06 / Бакиев Саиднасим Алимович. – Ташкент, 2011. – 46 с.
16. Бакуменко, Л.П. Интегральная оценка качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона (на примере Республики Марий Эл) / Л.П. Бакуменко, П.А. Коротков // Прикладная эконометрика. – 2008. – №1. – С.73–91.
17. Барановская, Н.В. Проявленность предприятий ядерно-топливного цикла при исследовании микроэлементного состава волос человека / Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов // Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы – биофилы в окружающей среде: Материалы 2 Международной научно-практической конференции, Семипалатинск, 16–18 октября 2002 г. – Семипалатинск, 2002. – Т. 2. – С. 445–448.
18. Барановская, Н.В. Элементный состав биологических материалов и его использование для выявления антропогенно — измененных территорий (на примере южной части Томской области): дисс. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Барановская Наталья Владимировна. – Томск, 2003. – 172 с.
19. Барановская, Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем: дисс. ... д-ра биол. наук: 03.02.08 / Барановская Наталья Владимировна. – Томск, 2011. – 373 с.
20. Барановская, Н.В. Очерки геохимии человека / Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, Т.Н. Игнатова и др. – М.: Изд-во ТПУ, 2015. – 380 с.
21. Баштан, Ф.А. Допустимые концентрации ядовитых веществ в водоемах / Ф.А. Баштан, С.А. Несмеянов, Г.К. Чистяков / Под общ. ред. А.Н. Сысина. – М.: Гос. изд-во строит лит-ры, 1941. – 56 с.
22. Бгатов, А.В. Биогенная классификация химических элементов / А.В. Бгатов // Журнал "Философия науки". – 1999. – №2(6). – С. 12–24.

23. Безель, В. С. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов надземной фитомассой травянистой растительности / В. С. Безель, Т. В. Жуйкова // Экология. – 2007. – № 4. – С. 259–267.
24. Белан, Л.Н. Геоэкологические основы природно-техногенных экосистем горнорудных районов Башкортостана: автореф. дис. .... докт. геол.-мин. наук: 25.00.36 / Лариса Николаевна. – Москва, 2007. – 50 с.
25. Белкин, А. Д. Геологическое строение Новосибирской области. Полезные ископаемые, породы и минералы / А.Д. Белкин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rgo-sib.ru/science/18.htm> (Дата обращения: 20.02.2017).
26. Бернатонис, В.К. Бром в торфах Томской области / В.К. Бернатонис, В.С. Архипов, В.И. Резчиков, Д.Ю. Балабаев // Рациональное использование природных ресурсов Сибири: тезисы докладов научной конференции, г. Томск, 1989. – С. 28.
27. Биккулова, А.Т. Биоэлементология s-, p-, d- элементов / А.Т. Биккулова, Г.М. Ишмуратова. – СПб.: Недра, 1999. – 256 с.
28. Богачев, Д.А. Содержание токсичных элементов в биологической цепи в условиях техногенного загрязнения: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 03.00.16 / Богачев Дмитрий Александрович. — Москва, 2001. – 19 с.
29. Бокова, Т.И. Закономерности детоксикации антропогенных загрязнителей (тяжелых металлов) в системе почва - растение - животное - продукт питания человека: дис. ... док. биол. наук: 03.00.16 / Бокова Татьяна Ивановна. — Новосибирск, 2005. – 345 с.
30. Бояркина, А.П. Применение ядерно-физических методов анализа в контроле окружающей среды / А.П. Бояркина, Н.В. Васильев и др. // Труды I Всес. совещ. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – С. 53–60.
31. Бром в соляных отложениях и рассолах как геохимический индикатор их генезиса, истории и поисковый признак / Сборник статей // Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет / под ред. А.П. Виноградова (отв. ред.) и др. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 455 с.
32. Бурксер, Е. Определение брома и йода в атмосферном воздухе при их совместном присутствии / Е. Бурксер, В. Бурксер // Прикладная химия. – 1937. – №. 10. – С. 2153.
33. Вернадский, В.И. Химический состав живого вещества в связи с химией земной коры / В.И. Вернадский. – Петроград: Время, 1922. – 48 с.
34. Вернадский, В.И. Живое вещество / В.И.Вернадский // Живое вещество и биосфера. – М.: Наука, 1994. – С. 19–314.

35. Верховская, И.Н. Бром в живом организме и механизм его действия / И.Н.Верховская. – М.: АН СССР, 1962. – 602 с.
36. Виноградов, А.П. Йод в морских илах. О происхождении йод - бромных вод нефтеносных районов / А.П. Виноградов // Труды биогеохимической лаборатории АН СССР. – 1939. – Т. 5. – С. 19 – 32 с.
37. Виноградов, А. П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре / А.П. Виноградов // Геохимия. – 1956. – № 1. – С. 6–52.
38. Виноградов, А. П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры / А.П. Виноградов // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
39. Войнар, А.И. Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека / А.И. Войнар. – М.: Наука, 1960. – 497 с.
40. Воробьева, К.Ю. Эколого-геохимические особенности почвенного покрова санитарно-защитных зон некоторых промышленных предприятий Самарской области / К.Ю. Воробьева, Н.В. Прохорова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – №17(5–2). – С. 636–639.
41. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I-IV групп: справочник / под ред. В.А. Филова. – Л.: Химия, 1988. – 512 с.
42. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/ru/> (Дата обращения: 24.02.2017).
43. Гагина, Н.В. Методы геоэкологических исследований: курс лекций / Н.В. Гагина, Т.А. Федорцова. – Минск: БГУ, 2002. – 98 с.
44. Гамм, Т.А. Дифференциация территории по экологическим показателям техногенной нагрузки / Т.А. Гамм, А.Ж. Калиев // Вестник ОГУ. – 2011. – №9. – С. 98–101.
45. Геологическое строение окрестностей г. Томска (территории прохождения геологической практики): учебное пособие / С.С. Гудымович, И.В. Рычкова, Э.Д. Рябчикова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 84 с.
46. Геология и полезные ископаемые Западной Сибири / ред. А.В. Каныгин, В.Г.Свиридов ; МПР РФ; ОАО «Новосибирскгеология»; ОИГГМ СО РАН. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. – Т. 1. Геологическое строение. – 228 с.
47. Глазовская, М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР / М. А. Глазовская. – М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
48. Глазовский, Н. Ф. Техногенные потоки вещества в биосфере // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. – М.: Наука, 1982. – С. 7–28.

49. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. – 2003.
50. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – 2003.
51. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. – 2003.
52. Гнедая, И.Л. Анализ современных методов оценки состояния окружающей среды при воздействии негативных факторов элементов ЯТЦ / И.Л. Гнедая, В.А. Диордица, М.Ф. Кожевникова, В.В. Левенец // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2007. – №9. – С. 17–31.
53. Горелов, Ю.П. Ученые Сибири на оборонные нужды отечества в годы первой мировой войны (1914 – 1918 гг.) / Ю.П. Горелов // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2014. – № 3 (59). – С. 161–165.
54. ГОСТ 17.4.1.02–83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения.
55. ГОСТ 17.4.3.01–83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к охране почв.
56. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
57. ГОСТ Р 51592-2000 Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 32 с.
58. ГОСТ Р ИСО 14051-2014 Экологический менеджмент. Учет затрат на материальные потоки. Общие принципы. – 2014.
59. Государственный доклад «О состоянии санитарно– эпидемиологического обстановке на территории Томской области в 2006 году» / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Томской области. – Томск, 2007. – 169 с.
60. Государственный доклад «О состоянии санитарно– эпидемиологического благополучия населения в Томской области в 2012 году» / ред. В.Г. Пелипенко; Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Томской области. – Томск, 2013. – 175 с.
61. Государственный доклад «О состоянии санитарно– эпидемиологического благополучия населения в Томской области в 2015 году» / ред. В.Г. Пелипенко; Федеральная служба по

- надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Томской области. – Томск, 2016. – 184 с.
62. Гринвуд, Н.Н. Химия элементов: в 2 т / Н.Н. Гринвуд, А. Эршно. – М.: Бином, 2008. – Т. 2. – 670 с.
  63. Гробе, А. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов: обзорная информация / А. Гробе, О. Ренн, А. Джегер // Вестник Российской академии наук. – 2009. – №5. – С. 3–80.
  64. Грушко, Я. М. Вредные неорганические соединения в промышленных сточных водах / Я.М. Грушко. – Л.: Химия, 1982. — 216 с.
  65. Гусев, Н.Г. Радиоактивные цепочки. Справочник / Н.Г.Гусев, Дмитриев П.П. – М.: Атомиздат, 1978. – 88 с.
  66. Данилова, Н.В. Оценка воздействия на окружающую среду: имплементация международно-правовых требований в российское законодательство / Н.В. Данилова, С.А. Каримова // Международное право. — 2015. – № 2. – С.110–121.
  67. Денисова, О.А. Микроэлементы и патология щитовидной железы в Томской области / О.А. Денисова, Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов и др. – Томск: STT, 2011. – 190 с.
  68. Досмагамбетова, Р.С. Экологические риски и здоровье населения / Р.С. Досмагамбетова, А. А. Турмухамбетова, С. П. Терехин, М. Г. Калишев // Медицина и экология. – 2014. – №3. – С. 5–10.
  69. Дрюцкая, С.М. Медико-экологическая оценка йодной недостаточности на территории Хабаровского края в условиях природного йоддефицита: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Дрюцкая Светлана Михайловна. — Хабаровск, 2005. – 176 с.
  70. Дубровская, С.А. Экологическое зонирование территории города Оренбурга / С.А. Дубровская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – №5. – С. 22–25.
  71. Евсеева, Н. С. География Томской области. Природные условия и ресурсы / Н. С. Евсеева. – Томск: Изд-во Томского университета, 2001. – 223 с.
  72. Егорова, Н.А. Методические основы гигиенической оценки качества воды: дис. ... д-ра мед. наук: 14.00.07 / Егорова Наталья Александровна. – Москва, 2003. – 276 с.
  73. Елисеева, Е. В. Применение подходов оценки стоимости жизненного цикла продукции (LCC) и оценки жизненного цикла продукции (LCA) при проектировании новых видов продукции / Е. В. Елисеева // Вестник МГОУ. Серия: Экономика. – 2014. – № 4. – С. 128–135.
  74. Ермаков, В.В. Химический элементный состав живого вещества / В.В. Ермаков, С.Ф. Тютиков // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2009. – № 1 (9). – С. 3–21.

75. Ермашова, Н.А. Обобщение материалов по химическому составу питьевых подземных вод в связи с повышенным содержанием в них железа, марганца и других специфических для региона компонентов в пределах юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна (отчет гидрогеохимической партии по работам за 1976 – 1982 гг.) Н.А. Ермашова. – Томск: Томская ГРЭ, 1982.
76. Ермолаева, С.В. Интегральная оценка качества окружающей среды территорий Ульяновской области / С.В. Ермолаева, В.В. Ключков, Е.О. Иванов // Вектор науки ТГУ. – 2014. – №3(29). – С. 26–31.
77. Жорняк, Л. В. Эколого-геохимическая оценка территории г. Томска по данным изучения почв: автореф. дис. ... канд. геол.–мин. наук: 25.00.36 / Жорняк Лина Владимировна. – Томск, 2009. – 24 с.
78. Завалишин, Н.Н. Моделирование реакции болотных экосистем регионов России на изменения климата / Н.Н. Завалишин // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием "Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований", Казань: Изд-во "Бриг". – 2009. – Т.1. – С. 92-93.
79. Зайчик, В.Е. Некоторые методологические вопросы медицинской элементарологии / В.Е. Зайчик, Н.А. Агаджанян // Вестник восстановительной медицины. – 2004. – № 3(9). – С. 19–23.
80. Захарова, Е.В. Эколого – радиационное состояние природной среды Тюменской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Захарова Елена Викторовна. — Тюмень, 2006. – 24 с.
81. Земцов, А.А. География Томской области / А.А. Земцов. – Томск: ТУ, 1988. – 246 с.
82. Иванов, А. Ю. Закономерности распределения химических элементов в вертикальном профиле донных отложений слабопроточных водоемов Томского района / А. Ю. Иванов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 2. – С. 88-101.
83. Иванов, В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник / В.В. Иванов: в 6 кн. / под ред. Э.К. Бурнекова. – М.: Недра, 1996. – Кн. 3. Редкие р-элементы. – 352 с.
84. Иванова, Э.В. Оценка риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих атмосферу / Э.В. Иванова, В.В. Быкова, Н.А. Осипова // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т.19, № 11. – С. 965–968.
85. Игнатова, Т.Н. Элементный состав организма человека и его связь с факторами среды обитания: дис. ... геол.–мин. наук: 25.00.36 / Игнатова Татьяна Николаевна. – Томск, 2010. – 228 с.

86. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / С.В. Григорян, А.П. Соловов, М.Ф. Кузин. – М.: Недра, 1983. – 191 с.
87. Исидоров, В.А. Введение в курс химической экотоксикологии: учебное пособие / В.А. Исидоров. – СПб.: Изд-во С.- Петерб. ун-та, 1997. – 88 с.
88. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас Х. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
89. Качество воздуха в крупнейших городах России за десять лет (1998–2007 гг.): аналитический обзор / Министерство природных ресурсов и экологии РФ. – Санкт–Петербург, 2009. – 133 с.
90. Квашнина, С.И. Здоровье населения на севере России (социально–гигиенические и экологические проблемы) / С.И. Квашнина. – Ухта, 2001. – 261 с.
91. Келлер, А.А. Медицинская экология / А.А. Келлер, В.И. Кувакин. – Спб.: Петроградский и К, 1998 – 256 с .
92. Кизильштейн, Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях / Л.Я. Кизильштейн. Ростов-на-Дону: СК НЦ ВШ, 2002. – 296 с.
93. Кирюхин, В.А. Гидрогеохимия / В.А. Кирюхин, А.И. Коротков, С.Л. Шварцев. – М.: Недра, 1993. – 384 с.
94. Кист, А.А. Исследование по нейтронному активационному анализу объектов биосферы: автореф. дис. ... д–ра хим. наук: 02.071. – Ленинград, 1969. – 26 с.
95. Клер, В.Р. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Геохимия элементов / В.Р. Клер, Г.А. Волкова, Е.М. Гуревич и др. М.: Наука, 1987. – 239 с.
96. Кириллов, С.Н. Комплексная геоэкологическая оценка территории города Волгограда / С.Н. Кириллов, Ю.С. Половинкина // Вестник Волгоградского государственного университета. – 2011. – №1(18). – С. 239–245.
97. Ковальский, В. В. Геохимическая экология / В. В. Ковальский. – М.: Наука, 1974. – 420 с.
98. Колубаева, Ю.В. Гидрогеохимия северо-восточной части Колывань-Томской складчатой зоны: дисс. ... канд. геол.–мин. наук: 25.00.07 / Колубаева Юлия Викторовна. – Томск, 2015. – 191 с.
99. Комплексная эколого-геохимическая оценка техногенного загрязнения окружающей природной среды / Э.К. Буренков, Л.Н. Гинзбург, Н.К. Грибанова и др. – М.: Изд-во ПРИМА-ПРЕСС, 1997. – 72 с.
100. Конарбаева, Г. А. Бром в почвах юга Западной Сибири / Г.А. Конарбаева // Агрохимия. – 2001. – № 3. – С. 75 – 81.

101. Конарбаева, Г.А. Галогены в почвах юга Западной Сибири / Г.А. Конарбаева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 200 с.
102. Конарбаева, Г.А. Галогены в природных объектах юга Западной Сибири: дис. ... д-р. биол. наук: 03.00.27 / Конарбаева Галина Акмулдиновна. – Новосибирск, 2008. – 365 с.
103. Кондратьева, Т. А. Статистический анализ и моделирование экологических процессов в водных экосистемах на примере р. Казанка / Т.А. Кондратьева, Ю.В. Максимов, Р.Н. Исмаилова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №21(16). – С. 309–313.
104. Красинцева, В.В. Гидрогеохимия хлора и брома / В.В. Красинцева. – Москва: Наука, 1968. – 196 с.
105. Кривобок, Ю.В. Проллиферативные процессы в тиреоидной паренхиме: автореф. дис. ... д-ра. биол. наук: 03.00.11 / Кривобок Юрий Васильевич. – Москва, 1972. – 32 с.
106. Кротова, В.А. Волго-Уральская нефтеносная область. Гидрогеология / В.А. Кротова. – Л.: Гостоптехиздат, 1956. – 267 с.
107. Ксензенко, В.И. Химия и технология брома, йода и их соединений / В.И. Ксензенко, Д.С. Стасиневич. – М.: Химия, 1995. – 432 с.
108. Кулясов, И.П. Экологический след: возможные перспективы развития в XXI веке / И.П. Кулясов // Социосфера: Социология и право. – 2014. – №14. – С.131–136.
109. Куролап, С.А. Геоэкологические аспекты мониторинга здоровья населения промышленных городов / С.А. Куролап // Соровский образовательный журнал. – 1998. – №6. – С. 21–28
110. Ленинджер, А. Основы биохимии / А. Ленинджер. – М.: Мир, 1985. – 367 с.
111. Лиманова, Е.Г. Методы регулирования охраны окружающей среды в России и за рубежом: анализ выбора инструментов природоохранной политики и их эффективность / Е.Г. Лиманова // Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. – 2005. – Т.5 (2). – С.49–64.
112. Маслеева, О. В. Комплексная экологическая оценка жизненного цикла малой распределенной и возобновляемой энергетики / О. В. Маслеева, Г. В. Пачурин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8. – С. 81–86.
113. Межибор, А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Межибор Антонина Михайловна–Томск, 2009. – 22 с.
114. Метелев, В. В. Водная токсикология / В.В. Метелев, А.И. Канаев, Н.Г. Дзасохова. – М.: Колос, 1971. – 247 с.



115. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.
116. Михальчук, А. А. Статистический анализ эколого-геохимической информации: учебное пособие / А. А. Михальчук, Е. Г. Язиков, В. В. Ершов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 235 с.
117. Могош, Г. Острые отравления / Г. Могош. – Бухарест.: Медицинское издательство, 1984. – 579 с.
118. Мищенко, М. В. Термальные воды меловых отложений юго-восточной части Западно-сибирского артезианского бассейна: распространение, использование, прогнозы: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.07 / Мищенко Мария Валерьевна. – Томск, 2013. – 23 с.
119. Мозговая, О. С. Применение концепции «Экологический след» для расчета резервов экологической емкости с целью определения рекреационной нагрузки в национальных парках Беларуси / О.С. Мозговая // Журнал международного права и международных отношений. – 2007. – №2. – С.85–93.
120. Моисеенко, Т.И. Водная экотоксикология : теоретические и прикладные аспекты / Т.И. Моисеенко // Институт водных проблем РАН. – М. : Наука, 2009. – 400 с.
121. Монголина, Т. А. Геохимические особенности солевых отложений (накипи) питьевых вод как индикатор природно-техногенного состояния территории: дис. ... канд. геол.– мин. наук: 25.00.36 / Монголина Татьяна Александровна. – Томск, 2011. – 148 с.
122. Мордкович, Я.Б. Бромистый метил: "ЗА" и "ПРОТИВ" / Я.Б. Мордкович // Журнал Агробезопасность. – №5 (5). – С. 34 – 35.
123. Мусихина, Е.А. Оценка экологического риска территории Иркутской области / Е.А. Мусихина // Успехи современного естествознания. – 2012. – №2. – С. 26–30.
124. Назаров, А.Д. Нефтегазовая гидрохимия юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / А.Д. Назаров. – М. : Идея-Пресс, 2004. – 288 с.
125. Наркович, Д. В. Элементный состав волос детей как индикатор природно-техногенной обстановки территории (на примере Томской области) : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.36 / Наркович Дина Владимировна. – Томск, 2012. – 21 с.
126. Николаева, И.В. Бакчарское месторождение оолитовых железных руд / И.В. Николаева. – Новосибирск: АН СССР, 1967. – 129 с.
127. Овсянников, Н.В. Загрязнение окружающей среды и заболеваемость бронхиальной астмой взрослого населения крупного промышленного города / Н.В. Овсянников, В.А. Ляпин, С.Н. Авдеев // Казанский медицинский журнал. – 2011. – №4. – 577–581 с.

- 128.Омельченко, И. Н. Современные подходы к оценке жизненного цикла продукции / И. Н. Омельченко, А. Е. Бром // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. – 2013. – № 2 (21). – С. 29–34.
- 129.Осипова, Н.А. Тяжелые металлы в почве и овощах как фактор риска для здоровья человека / Н.А. Осипова, Е.Г. Языков, Е.П. Янкович // Фундаментальные исследования. – 2013. –№ 8–3. – С. 681–686.
- 130.Основные социально-экономические характеристики Томской области: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Томской области [Электронный ресурс] URL: [http://tmsk.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/tmsk/ru/statistics/](http://tmsk.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/tmsk/ru/statistics/) (Дата обращения: 13.01.2017).
- 131.Остромогильский, А.Х. Тяжелые металлы в атмосфере: Источники поступления и методы оценки их влияния / А.Х. Остромогильский, В.А. Петрухин // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – Вып. 2. – С. 56–70.
- 132.Памяти первых российских биогеохимиков / под ред. Э.М. Галимова. – М.: Наука, 1994. – 222 с.
- 133.Парначёв, В.П. Геология и полезные ископаемые окрестностей города Томска: Материалы к полевой геологической экскурсии: Справочное пособие / В.П. Парначев, С.В. Парначев. – Томск: Томский государственный университет, 2010. – 144 с.
- 134.Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. – М.: Высшая школа, 1975. – 341 с.
- 135.Перельман, А.И. Геохимия ландшафта и проблема эволюции нервной системы / А.И. Перельман // Вестник Московского университета. Серия география. – 1979. – №2. – С. 20-26.
- 136.Перельман, А.И. Геохимия / А.И. Перельман. – М.: Высшая школа, 1989. – 423 с.
- 137.Перечень предельно-допустимых концентраций и ориентировочно безопасных уровней воздействия вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов. – М.: ТОО «Мединор», 1995.
- 138.Перминова, Т.А. Исследование геохимических показателей экосистем горячих источников / Т.А.Перминова, Е.В.Денисова // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, Томск: Изд-во ТПУ. – 2012. – Т. 1. – С. 593-594.
- 139.Перминова, Т.А. Геохимические особенности экосистем минеральных источников Байкальской рифтовой зоны / Т.А.Перминова // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, Томск: Изд-во ТПУ. – 2013. – Т. 1. – С. 589-590.

140. Перминова, Т.А. Бром в почвах Томской области / Перминова Т.А., Барановская Н.В., Ларатт Б. и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т.328. – № 2. – С. 36–45.
141. Пименова, Е.В. Нормирование качества окружающей среды и сельскохозяйственной продукции: учебное пособие / Е.В. Пименова. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО Пермская ГСХА, 2009. – 74 с.
142. Погода и климат Томска [Электронный ресурс] URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/29430.htm> (Дата обращения: 10.01.2017).
143. Покатилов, Ю.Г. Биогеохимия элементов, нозогеография юга Средней Сибири / Ю.Г. Покатилов. – Новосибирск: Наука, 1992. – 168 с.
144. Полянский, Н.Г. Аналитическая химия элементов. Бром / Н.Г. Полянский. – М.: Наука, 1980. – 248 с.
145. Потребление основных продуктов питания населением Российской Федерации: Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] URL: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc\\_1286360627828\\_\(Дата обращения: 10.01.2017\)](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1286360627828_(Дата%20обращения%3A%2010.01.2017)).
146. Припутина, И.В. Экологические риски в связи с техногенным загрязнением окружающей среды: анализ подходов и методов оценки / И.В. Припутина, В.Н. Башкин // Проблемы анализа риска. – 2012. – №5. – С. 12–25.
147. Притужалова, О.А. 2007 Оценка экологического воздействия жизненного цикла продукции / О.А. Притужалова // Вестник Тюменского государственного университета. Социально-экономические и правовые исследования. – 2007. – №3. – С. 152–158.
148. Пшеничкин, А.Я. Петрографо-геохимические особенности руд Бакчарского месторождения / А.Я. Пшеничкин, В.А. Домаренко // Вестник науки Сибири. – 2011. – №1 (1). – С. 13–18.
149. Ревич, Б.А. Химические элементы в волосах человека как индикатор воздействия загрязнения производственной и окружающей среды / Б.А. Ревич // Гигиена и санитария. – 1990. – №3. – С.55–59.
150. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / под. ред. Н. С. Касимова. – М.: ИП Филимонов М. В., 2014. – 560 с.
151. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна / С. И. Арбузов, В. В. Ершов, А. А. Поцелуев, Л. П. Рихванов. – Кемерово: Изд-во КПК, 2000. – 246 с.
152. Реми, Г. Курс неорганической химии / Г. Реми. – М.: ИИЛ, 1963. – Т. 1. – 922 с.
153. Рихванов, Л.П. Геохимия почв и здоровье детей Томска / Л. П. Рихванов и др. – Томск: Изд-во ТПУ, 1993. – 142 с.

154. Рихванов, Л.П. Общие и региональные проблемы радиозэкологии / Л.П. Рихванов. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
155. Рихванов, Л.П. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения – как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Л.П. Рихванов, С.С. Кропанин, С.А. Бабенко и др.; отв. ред. Е.Н. Трибунский, М.С. Провинчак. – Кемерово : Сарс, 2001. – 214 с.
156. Рихванов, Л. П. Исследование уровня и динамика накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев / Л. П. Рихванов, Т. А. Архангельская, В. Д. Несветайло // Геохимия. – 2002. – № 11. – С. 1238–1245.
157. Рихванов, Л.П. Состояние компонентов природной среды Томской области по данным эколого-геохимического мониторинга и здоровье населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Языков, Н.В. Барановская и др. // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 1 (85). – С. 29–37.
158. Рихванов, Л. П. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиозэкологической ситуации / Л. П. Рихванов, Т. А. Архангельская, Ю. Л. Замятина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 147 с.
159. Рихванов, Л.П. Минералого-геохимические особенности баженовской свиты Западной Сибири по данным ядерно-физических и электронно-микроскопических методов исследований / Л.П. Рихванов, Д. Г. Усольцев, С.С. Ильенок, А.В. Ежова // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 1. – С. 50-63.
160. Роговая, О.Г. Экологическое моделирование: практика: учебно–методическое пособие / О.Г. Роговая. – СПб.: ООО «Книжный Дом», 2007. – 104 с.
161. Розанов, Л.Л. Методологический аспект геоэкологии / Л.Л. Розанов // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. – 2015. – №2. – С. 46–56.
162. Розен, Б.Я. Геохимия брома и йода / Б.Я. Розен. – М.: Недра, 1970. – 143 с.
163. Росляков, Н.П. Биологическая роль микроэлементов / Н.П. Росляков. – М.: Наука, 1983. – С. 211-217.
164. Саенко Г. Н. Металлы и галогены в морских организмах / Г.Н.Саенко. – М.: Наука, 1992. – 200 с.
165. Сает, А. И. Геохимия окружающей среды / А. И. Сает, Б. А. Ревич, Е. П. Янин. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
166. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. – 2001.
167. СанПиН 2.1.4.1116-02. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества. – 2002.

168. Сарнаев, С. И. Оценка экологической обстановки в г. Северске по результатам геохимического исследования природных сред / С.И. Сарнаев, Л.П. Рихванов, А.Л. Мерзляков // Природокомплекс Томской области. Том 1. Геология и экология, Томск.: Изд. ТГУ. – 1995. – С. 224 – 231.
169. Селиванов, Л.С. Геохимия и биогеохимия рассеянного брома / Л.С. Селиванов. – Труды биогеохимической лаборатории АН СССР. Вып. 8, 1946. – С.5 – 72.
170. Сенотрусова, С.С. Влияние загрязнения окружающей среды на заболеваемость населения промышленных городов: дисс. ... д-ра биол.наук: 03.00.16 / Сенотрусова Светлана Валентиновна. – Владивосток, 2005. – 444 с.
171. Сергиенко, О. И. Определение экологических характеристик продовольствия на основе оценки жизненного цикла продукции / О. И. Сергиенко, С. Е. Копыльцова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2011. – № 1. – С. 284–298.
172. Соболев, И. С. О возможности изучения элементного состава снегового покрова при геохимическом картировании зон и областей внедрения глубинных флюидов (нефтегазопроисводческий аспект) / И. С. Соболев // Геология нефти и газа. – 2013. – № 1. – С. 68–77.
173. Соктоев, Б. Р. Геохимия карбонатной составляющей природных пресных вод и ее индикаторное значение в эколого-геохимических и прогнозно-металлогенических исследованиях (на примере Байкальского региона): дисс. ... канд. геол.–мин. наук: 25.00.09 / Соктоев Булат Ринчинович. – Томск, 2015. – 148 с.
174. Солтанмурадова, З.И. Эколого-геохимическая оценка урбанозёмов г. Каспийска / З.И. Солтанмурадова, Н.О. Гусейнова, Р.Т. Раджабова // Юг России: экология, развитие. – 2012. – №4. – С. 116–121.
175. Сосунова, И.А. Роль экологических факторов в формировании здоровья современного человека / И.А. Сосунова // Экология ЦЧО РФ. – 2013. – №1–2(30–31). – С.129–131.
176. Социально–экономические аспекты инвалидности / под ред. Ю.В. Михайловой, А.Е. Ивановой. – М.: РИО ЦНИИОИЗ, 2006. – 136 с.
177. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды: пат.2298212 Рос. Федерация. Л. П. Рихванов, Е. Г. Язиков, Н. В. Барановская, Е. П. Янкович; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2005120840; заявл. 04.07.05; опубл. 27.04.07.
178. Станкевич, С.С. Микроэлементный состав грудного молока женщин и состояние здоровья их детей, проживающих в условиях современного города: автореф. дис. ...канд. мед. наук: 14.01.08 / Станкевич Светлана Сергеевна. – Томск, 2010. – 23 с.

179. Старостина, В.Ю. Использование методов оценки воздействия на окружающую среду при выборе перспективного способа обращения с отходами производства и потребления / В.Ю. Старостина, О.В. Уланова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 1–8.
180. Страховенко, В. Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири : автореф. дис. ... док. геол.-мин. наук: 25.00.09 / Страховенко Вера Дмитриевна. – Новосибирск, 2011. – 33 с.
181. Сулин, В. А. Воды нефтяных месторождений в системе природных вод / В.А. Сулин. – Л.: Гостоптехиздат, 1946. – 95 с.
182. Сухих, Ю.И. Гигиенические аспекты здоровья населения в условиях антропогенного загрязнения окружающей среды (на примере Томского района): автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.00.17 / Сухих Юрий Иванович. – Москва, 2005. – 25 с.
183. Сысо, А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири / А. И. Сысо. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 227 с.
184. Тагилова, О.А. Повышение экологической безопасности полигонов твердых бытовых отходов на основе анализа потоков органического углерода : дисс. ... канд. тех. наук : 25.00.36 / Тагилова Ольга Анатольевна. – Пермь, 2006. – 186 с.
185. Таловская, А. В. Оценка эколого-геохимического состояния районов г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей: автореф. дис. ... канд. геол.–мин. наук: 25.00.36 / Таловская Анна Валерьевна. – Томск, 2008. – 23 с.
186. Тегако, Л.И. Динамика адаптивной изменчивости населения Беларуси / Л.И. Тегако. – Минск: Беларус.навука, 2013 – 303 с.
187. Тектоника Томской области / Российский геологический портал [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosgeoportal.ru/subsoil/tomsk/sitepages/tectonics.aspx> (Дата обращения: 18.02.2017).
188. Теняникова, Д.В. Агроклиматические условия сельскохозяйственного производства в Западной Сибири / Д.В. Теняникова // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, Томск: Изд-во ТПУ. – 2016. – Т. 1. – С. 797–799.
189. Терпак, Э. Районирование территории Томской области по результатам комплексной оценки накопления брома в окружающей среде и организме человека: дипломная работа / Терпак Элина Михайловна. – Томск, 2008. – 134 с.
190. Тимашев, И.Е. Геоэкология как эколого–ландшафтная наука / И.Е. Тимашев // Вестник ВГУ. Серия: география, геоэкология. – 2007. – №1. – С. 5–11.

- 191.Ткалич, С. М. Некоторые общие закономерности содержания химических элементов в золе растений. Биогеохимические поиски рудных месторождений / С. М. Ткалич. – Улан-Уде: Изд-во СО АН СССР, 1969. – 179 с.
- 192.Ткачев, Ю.А. Статистическая обработка геохимических данных / Ю.А. Ткачев, Я.Э. Юдович. – Л.: – Наука, 1975. – 233 с.
- 193.Турецкая, Э.С. Врачебное дело / Э.С. Турецкая. – 1963. – №. 7. – С. 113–118.
- 194.Уланова, О.В. Краткий обзор метода оценки жизненного цикла продукции и систем управления отходами / О. В. Уланова, В. Ю. Старостина // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – С.1–8.
- 195.Федеральный закон от 23 ноября 1995 г. N 174-ФЗ "Об экологической экспертизе".
- 196.Федеральное агентство по рыболовству [Электронный ресурс] URL: <http://www.fish.gov.ru/> (Дата обращения: 10.01.2017).
- 197.Филькин, Т.Г. О перспективах применения анализа материальных потоков (MFA – Material Flow Analysis) в сфере управления отходами / Т.Г. Филькин, Я.В. Базылева, В.Н. Коротаев // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2012. – №3. – С.49–61.
- 198.Фузелла, Т.Ш. Количественная оценка и картографирование энергопотенциала гумусового слоя для почв Томской области / Т.Ш. Фузелла // Интерэкспо Гео-Сибирь– 2013. – №2, Т.4 – С. 1–3.
- 199.Хабарова, А.В. Экологический риск загрязнения атмосферного воздуха выбросами тепловых электростанций при использовании каменного угля: дисс. ... канд. тех. наук : 21.06.01 / Анна Владимировна Хабарова. – Харьков, 2016. – 144 с.
- 200.Химическая энциклопедия: в 5 т / под. ред. И.Л. Кнунянц. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т.1. – 623 с.
- 201.Человек. Медико-биологические данные. Доклад рабочей группы комитета II МКРЗ по условному человеку. – М.: «Медицина», 1977. – 445 с.
- 202.Черненькая, Е.В. Динамика изменения элементного состава природной среды по данным изучения гербарных и современных сборов растений юга Сибири: дисс. ... канд. геол.–мин. наук: 25.00.36 / Черненькая Елена Владимировна. – Томск, 2015. – 260 с.
- 203.Чертко, Н.К. Геохимия и экология химических элементов / Н.К. Чертко, Э.Н. Чертко. – Минск: Издательский центр БГУ, 2008. – 140 с.
- 204.Шайхиев, И.Р. Эколого-геохимическое состояние компонентов природной среды Бакчарского района на территории предполагаемого освоения ресурсов железных руд: дис. ... канд. геол.–мин. наук: 25.00.36 / Шайхиев Ильдар Рафаилович. – Томск, 2017. – 159 с.

205. Шакирова, К.В. Изучение особенностей элементного состава органов и тканей золы свиньи домашней (*Sus Scrofa Domestica*) / К.В. Шакирова // Материалы международной молодежной школы-семинар «Геохимия живого вещества», Томск: Изд-во ТПУ. – 2013. – С. 182–185.
206. Шаповалов, Ю.Д. // Врачебное дело. – 1974. – №. 11. – С. 130–134.
207. Шаповалов, Ю.Д. // Врачебное дело. – 1974а. – №. 12. – С. 110–115.
208. Шатилов, А. Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна : дис. ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.36 / Шатилов Алексей Юрьевич. – Томск, 2001. – 24 с.
209. Шварцев, С.Л. Перспективы использования промышленных рассолов Сибирской платформы для извлечения лития и брома / С.Л. Шварцев, С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Л.П. Алексеева // Интерэкспо–Гео–Сибирь. – 2011. – №1. – С. 1–5.
210. Шитова, Е.В. Содержание тяжелых металлов в биосубстратах детей в условиях промышленного города: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Шитова Елена Валерьевна. — Ярославль, 2006. – 19 с.
211. Шихова, О.А. Статистическая оценка социально-экономического и экологического состояния территории: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.12 / Шихова Оксана Анатольевна. – Вологда, 2007. – 255 с.
212. Шмаль, А.Г. Факторы экологической опасности & экологические риски / А.Г. Шмаль. – Издательство: МП «ИКЦ БНТВ», 2010. – 192 с.
213. Экологический мониторинг: Доклад о состоянии окружающей среды Томской области в 2011 году / Гл. ред. А. М. Адам, редкол.: В.А. Коняшкин, А.В. Дмитриев, Ю.В. Лунева. – Томск: Графика ДТР, 2012. – 166 с.
214. Экологический след субъектов Российской Федерации / Е.А. Шварц, А.Ю. Книжников, А.И. Воропаев и др. – Всемирный фонд дикой природы (WWF). — М.: WWF России, 2014. – 88 с.
215. Экология городской среды: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по естественнонаучным специальностям / А. А. Челноков, Л.Ф. Ющенко, Е.Е. Григорьева и др. / под общей редакцией К. Ф. Саевича. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 368 с.
216. Экология Северного промышленного узла г. Томска. Проблемы и решения / Под редакцией А. М. Адама. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 260 с.
217. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения / Л. П. Рихванов, Е. Г. Языков, Ю. И. Сухих и др. – Томск, 2006. – 216 с.
218. Эмсли, Дж. Элементы / пер. с англ. Е.А. Краснушкиной. – М.: Мир, 1993. – 256 с.



219. Юдович, Я.Э. Элементы-примеси в ископаемых углях / Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис, А.В. Мерц. Л.: Наука, 1985. – 239 с.
220. Юдович, Я.Э. Ценные элементы-примеси в углях / Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис. – Екатеринбург, 2006. – 539 с.
221. Язиков, Е. Г. Содержание радиоактивных и редкоземельных элементов в аэрозольных выпадениях снегового покрова различных территорий Западной Сибири / Е. Г. Язиков, Л. П. Рихванов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Международ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. – С. 312–316.
222. Язиков, Е.Г. Геоэкологический мониторинг / Е.Г. Язиков, А.Ю. Шатилов. – Томск, 2003. – 336 с.
223. Язиков, Е. Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири : дис. ... д-ра. геол.-мин. наук : 25.00.36 / Язиков Егор Григорьевич. – Томск, 2006. – 423 с.
224. Язиков, Е. Г. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Л. В. Жорняк. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.
225. Ялалтдинова, А.Р. Элементный состав растительности как индикатор техногенного воздействия на территории г. Усть-Каменогорска: дис. ... канд. геол.–мин. наук: 25.00.36 / Ялалтдинова Альбина Рашидовна. – Томск, 2015. – 172 с.
226. Янкович, Е.П. Оценка индивидуального канцерогенного риска для здоровья населения г. Томска по данным геохимического состава пылеаэрозольных выпадений / Е.П. Янкович, Н.А. Осипова, Е.Г. Язиков, А.В. Таловская // Известия вузов. Геология и разведка. – 2011. – №5. – С. 67–74.
227. Янкович, Е.П. Эколого-геохимическая оценка природной среды гидрогеоэкологического полигона «Томский» с использованием геоинформационных технологий : дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.36 / Янкович Елена Петровна. – Томск, 2017. – 136 с.
228. Ярошевский, А.А. Проблемы современной геохимии: конспект лекций, прочитанных в ГЕОХИ РАН в зимнем семестре 2003 – 2004 гг. / А.А. Ярошевский. – Новосибирск, 2004. – 194 с.
229. Abedinzadeh, Z. Determination of trace elements in iranian cigarette tobacco by neutron activation analysis / Z. Abedinzadeh, B. Parsa // Journal of Radioanalytical Chemistry. – 1973. – Vol.14. – P. 139–145.
230. Abrahams, P.W. Soils: their implications to human health / P.W. Abrahams // The Science of the Total Environment. – 2002. – Vol. 291. – P. 1–32.

231. Ahmad, S. Determination of toxic elements in tobacco products by instrumental neutron activation analysis / S. Ahmad, M.S. Chaudhry, I. Qureshi // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1979. – Vol. 54, No. 1-2. – P. 331–341.
232. Al-Dayel, O.A.F. Elemental content in wheat products of Al-Qusim region, Saudi-Arabia using INAA technique / O.A.F. Al-Dayel, S.A. Al-Kahtani // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2002. – Vol. 252, No. 3 – P. 605–609.
233. Anke, M. Essentiality of arsenic, bromine, fluorine and titanium for animal and man / M. Anke [et al.] // *Proceedings Book 3rd International symposium on trace elements in human: new perspectives*. – Greece, 2001. – P. 204–228.
234. Audi, G. The Nubase evaluation of nuclear and decay properties / G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot et al. // *Nuclear Physics A*. – 2003. – Vol. 729. – P. 3–128.
235. Awadallah, R.M. Determination of trace elements of some Egyptian crops by instrumental neutron activation, inductively coupled plasma-atomic emission spectrometric and flameless atomic absorption spectrophotometric analysis / R.M. Awadallah, M. K. Sherif, A. H. Amrallah et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*. – 1986. – Vol.98, No. 2. – P. 235–246.
236. Bagliani, M. A consumption-based approach to environmental Kuznets curves using the ecological footprint indicator / M. Bagliani, G. Bravo, S. Dalmazzone // *Ecological Economics*. – 2008. – Vol.65, No.3. – P. 650–661.
237. Bailey, R. Applying Ecological Input–Output Flow Analysis to Material Flows in Industrial Systems: Part I: Tracing Flows / R. Bailey, J.K. Allen, B. Bras // *Journal of Industrial Ecology*. – 2004. – Vol.8, No.1–2. – P. 45–68.
238. Baranovskaya, N.V. Trace elements in composition of biosubstrates of people living in a district of the nuclear plant of Russia / N.V. Baranovskaya L.P. Rikhvanov // *Macro and Trace Element : 21 Workshop*. – Jena : Friedrich Schiller University, 2002. – P. 1266–1270.
239. Begak, O.Y. Analysis of impurities in mixtures of West-Siberian crude oils / O.Y. Begak, A.M. Syroezhko // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2001. – Vol. 74, No. 7 – P. 1230–1234.
240. Bichler, M. Determination and speciation of minor and trace elements in volcanic exhalations by NAA / M. Bichler, K. Poljanc, F. Sortino // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1995. – Vol.192, No. 2. – P. 183–194.
241. Block, C. Concentration-data of elements in liquid fuel oils as obtained by neutron activation analysis / C. Block, R. Dams // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1978. – Vol. 46. – P. 137–144.
242. Brevik, E.C. The past, present, and future of soils and human health studies / E.C. Brevik, T.J. Sauer // *Soil*. – 2015. – Vol.1. – P. 35–46.

243. Bromine – general information / prepared by the Toxicology Department CRCE, PH, 2006 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/316642/Bromine\\_guidance.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/316642/Bromine_guidance.pdf) (дата обращения 02.05.2016).
244. Buchberger, W. Selective determination of bromide and iodide in serum and urine by gas chromatography / W. Buchberger, U. Huebauer // *Microchimica Acta*. – 1989. – Vol. 3. – P. 137–142.
245. Bumbalova, A. Multielement XRF-analysis of blood from patients with dilated cardiomyopathy / A. Bumbalova, E. Havranek, M. Harangozo et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters*. – 1991. – Vol.153, No. 4. – P. 257–265.
246. Caltox [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dtsc.ca.gov/AssessingRisk/caltox.cfm> (Дата обращения: 01.03.2017).
247. Chiu, S.F. Trace metals analysis of hair samples from students in metropolitan area high schools / S.F. Chiu, P.C. Wang, P.F. Koa et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2011. – Vol. 289. – P. 873–822.
248. Chueinta, W. Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by positive matrix factorization / W. Chueinta, P.K. Hopke // *Atmospheric Environment*. – 2000. – Vol. 34. – P. 3319–3329.
249. Cunningham V.L. Human health risk assessment from the presence of human pharmaceuticals in the aquatic environment // V. L. Cunningham, S. P. Binks, M. J. Olson // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. – 2009. – Vol.53, I.1. – P. 39–45.
250. De Vos, R.H. Pesticides and other chemical residues in Dutch total diet samples (June 1976 - July 1978) / R.H. De Vos, W. Van Dokkum, P. D. A. Olthof et al. // *Food and Chemical Toxicology*. – 1984. – Vol. 22, No. 1. – P. 11–21.
251. Denholm, P. Land-use requirements and the per-capita solar footprint for photovoltaic generation in the United States / P. Denholm, R.M. Margolis // *Energy Policy*. – 2008. – Vol.36, No.9. – P. 3531–3543.
252. Duce, R. Atmospheric iodine, bromine, and chlorine / R. Duce, J. Wasson, J. Winchester // *Journal of Geographical Research*. – 1963. – Vol. 68. – P. 3943–3947.
253. Eggenkamp, H. The geochemistry of stable chlorine and bromine isotopes / H. Eggenkamp. – Berlin: Springer, 2014. – 172 p.
254. Ehmman, W. D., Studies of trace element involvement in human disease by in vitro activation analysis // W.D. Ehmman, D.E. Vance // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*. – 1996. – Vol.203, No. 2. – P. 429–445.

255. Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements. Appendix II. Technical reports series. – № 197. – Vienna: IAEA, 1980. – P. 351–367.
256. Essential environmental health standards in health care / Edited by J. Adams, J. Bartram, Y. Chartier. – World Health Organization, 2008. – 57 p.
257. Fan, S.M. Surface ozone depletion in Arctic spring sustained by bromine reactions on aerosols / S.M. Fan, D.J. Jacob // *Nature*. – 1992. – Vol. 359. – P. 522–524.
258. Ferrer, N. Determination of sources of atmospheric aerosol in the neighbourhood of Barcelona based on receptor models / N. Ferrer, J.J. Perez // *Atmospheric Environment*. – 1990. – Vol. 24B, No. 1. – P. 181–184.
259. Fuge, R. Sources of halogens in the environment, influences on human and animal health // *Environmental Geochemistry and Health*. – 1988. – Vol. 10, No. 2. – P. 51–61.
260. Gammon, D.W. A risk assessment of atrazine use in California: human health and ecological aspects / D.W. Gammon, C.N. Aldous, W.C. Carr et al. // *Pest management science*. – 2005. – Vol. 61, №4. – P. 331–355.
261. Gandolli, S.D. The dictionary of substances and their effects, 2nd edition / S.D. Gandolli. – Royal Society of chemistry, 1999. – 865 p.
262. Gunther, F.A. Apparent organobromine compounds in higher plants by Neutron Activation Analysis / F.A. Gunther, R.E. Spenger // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 1966. – Vol. 1, No. 4. – P. 121–126.
263. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, technical reports series №472. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. – 208 p.
264. Hasanen, E. Chlorine and bromine contents in tobacco and tobacco smoke / E. Hasanen, P.K.G. Manninen, K. Himberg et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters*. – 1990. – Vol. 144, No. 5. – P. 367–374.
265. Henderson, A.D. USEtox fate and ecotoxicity factors for comparative assessment of toxic emissions in life cycle analysis: sensitivity to key chemical properties / A.D. Henderson, M.Z. Hauschild, D. Van de Meent et al. // *The international journal of Life cycle assessment*. – 2011. – Vol. 16, No. 8. – P. 701–709.
266. Hichwa, B.P. Trace metal content in aspirin and women's cosmetics via proton induced X-ray emission (PIXE) / B.P. Hichwa, D.D. Pun, D. Wang // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1981. – Vol. NS-28, No. 2. – P. 1410–1412.

267. Hoekstra, A.Y. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis / A.Y. Hoekstra // *Ecological Economics*. – 2009. – Vol.68. – P. 1963–1974.
268. Hong, L. Evaluating the effects of embodied energy in international trade on ecological footprint in China / L. Hong, Z.P. Dong, H. Chunyu, G. Wang // *Ecological Economics*. – 2007. – Vol.62, No.1. – P. 136–148.
269. Hou, X. A study of six elements daily dietary intake of Chinese people / X.Hou, Y. Zhang, C. Chai et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1997. – Vol. 222. – P. 165-170.
270. Howe, A. Elemental composition of Jamaican foods 1: A survey of five food crop categories / A.Howe, L.Fung, G. Lalor et al. // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2005. – Vol. 27. – P. 19–30.
271. Human health risk assessment protocol for hazardous waste combustion facilities / US – EPA – United States Environmental Protection Agency's, 2005. – 1284 p.
272. Hyvonen-Dabek, M. Trace element study of human bone by X-ray emission analysis using an external proton beam / M.Hyvonen-Dabek, J.Raisanen, J.T.Dabek // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1981. – Vol. 63, No. 1. – P. 163–175.
273. Igos, E. Development of USEtox characterisation factors for dishwasher detergents using data made available under REACH / E. Igos, R. Moeller, E. Benetto et al. // *Chemosphere*. – 2014. – Vol. 100. – P. 160-166.
274. Iskander, F. Y. Neutron activation analysis of an Egyptian cigarette and its ash // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*. – 1985. – Vol. 89, No. 2. – P. 511–518.
275. Iskander, F. Y. Determination of trace element impurities in aspirin tablets by neutron activation analysis / F.Y. Iskander, D.E Klein, T.L. Bauer // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*. – 1986. – Vol.97, No. 2. – P. 353–357.
276. Iskander, F.Y. Multielement determination in wheat and bran / F.Y. Iskander, M.M. Morad // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*. – 1986a. – Vol. 105, No. 3. – P. 151–156.
277. Jiang Q.T. Human health risk assessment of organochlorines associated with fish consumption in a coastal city in China / Q.T. Jiang, T.K.M. Lee, K. Chen et al. // *Environmental Pollution*. – 2005. – Vol.136, I.1. – P. 155–165.
278. Jolliet, O. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology / O. Jolliet, M. Margni, R. Charles et al. // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. – 2003. – Vol. 8, No. 6. – 324 p.
279. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants / A. Kabata-Pendias. – NW: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2011 – 4th ed. – 505 p.

280. Kennedy, W.E. Residual radioactive contamination from decommissioning: Technical Basis for Translating Contamination Levels to Annual Total Effective Dose Equivalent / W.E. Kennedy, D.L. Streng. – Pacific Northwest Laboratory, NUREG/CR-5512, PNL-79941, 1992. – 357 p.
281. Ko, S. Contribution of milk to daily intakes of iodine and bromine in northwestern Ukraine / S. Ko, K. Shiraishi, S.K. Sahoo et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2006. – Vol. 267, No. 3. – P. 575–579.
282. Kounina, A. Spatial analysis of toxic emissions in LCA: A sub-continental nested USEtox model with freshwater archetypes / A. Kounina, M. Margni, S. Shaked et al. // *Environment International*. – 2014. – Vol. 69. – P. 67–89.
283. Kroes, R. Oriënterend toxiciteits onderzoek van het bromide-ion in chloride-arm dieet bij de rat / R. Kroes, A.G. Rauws, C.H. Verhoef et al. // Report nr. 187 Tox. d.d. december from Rijks Instituut voor de Volksgezondheid. Submitted to WHO by RIVM. – Bilthoven, Holland, 1974.
284. Kulkarni, S.D. Bioaccessibility of some elements from wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) by in-vitro gastrointestinal digestion combined with neutron activation analysis using ammonium bicarbonate as an alternate base / S.D. Kulkarni, R.N. Acharya, S. Rajurkar et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2009. – Vol. 279, No. 3 – P. 713–718.
285. Li, J. Distribution of heavy metals in agricultural soils near a petrochemical complex in Guangzhou, China / J. Li, Y. Lu, W. Yin et al. // *Environmental monitoring and assessment*. – 2009. – Vol. 153, No. 1. – P. 365–375.
286. Lide, D. R. Basic laboratory and industrial chemicals: a CRC quick reference handbook / D.R. Lide. – CRC Press, 1993. – 371 p.
287. Lin, S. Instrumental neutron activation analysis of urinary calculi / S. Lin, C. Chiang, C. Huang et al. // *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. – 1985. – Vol. 96, No. 2. – P. 153–160.
288. Litch, O.A.B. Human health risk areas in the State of Paraná, Brazil: results from low density geochemical mapping / O.A.B. Litch // *TERRAE*. – 2005. – Vol. 2. – P. 9–19.
289. Mannan, A. Dietary evaluation of toxic elements through integrated diet / A. Mannan, S. Waheed, S. Ahmad et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1992. – Vol. 162, No. 1. – P. 111–123.
290. Marchand, M. Sur la constitution physique et chimique des eaux naturelles / M. Marchand // *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. – 1852. – Vol. 34. – P. 54–56.
291. Marchand, M. Évaluation locale de la toxicité liée à la gestion des déchets ménagers au travers de l'analyse du cycle de vie (ACV) et de USEtox / M. Marchand, L. Aissani, P. Mallard et al. // *Techniques Sciences Méthodes*. – 2013. – №9. – C. 36–49.

292. Matsubae–Yokoyama, K. A material flow analysis of phosphorus in Japan / K. Matsubae–Yokoyama, H. Kubo, K. Nakajima, T. Nagasaka // *Journal of Industrial Ecology*. – 2009. – Vol.13, No.5. – P. 687–705.
293. Matsuda, R. Determination of total bromine in foods by ECD gas chromatography (in Japanese with English abstract) / R. Matsuda, K. Sasaki, Y. Saito // *Bulletin of National Institute of Health Sciences*. – 1994. – Vol.112. – P. 108–111.
294. McKenzie, L. M. Human health risk assessment of air emissions from development of unconventional natural gas resources / L.M. McKenzie, R.Z. Witter, L.S. Newman, J.L. Adgate // *Science of the Total Environment*. – 2012. – Vol.424. – P. 79–87.
295. Metairon, S. Analysis of elements in human blood of patients with chronic kidney disease using neutron activation analysis / S. Metairon, C. Zamboni, L.Kovacs et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2009. – Vol. 282. – P. 81–84.
296. Mishra, U. C. Determination of trace element concentrations of Indian cigarette tobacco by instrumental neutron activation analysis / U.C. Mishra, G.N. Shaikh // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1983. – Vol. 78, No. 2. – P. 385–390.
297. Miura, K. Variation of concentration of ambient aerosols in Tokyo / K. Miura, T. Sekikawa // *Atmospheric Environment*. – 1990. – Vol. 24A, No. 6. – P. 1401–1407.
298. Moeller, D.W. *Environmental health* (3rd edition) / D.W. Moeller. – Harvard University Press, 2005. – 625 p.
299. Morales-Mora, M. A. Human and ecotoxicological impacts assessment from the Mexican oil industry in the Coatzacoalcos region, as revealed by the USEtox™ model // M.A. Morales-Mora, B. Rodríguez-Pérez, S.A. Martínez-Delgadillo // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2014. – Vol. 21, No. 16. – P. 9819–9831.
300. Muller, A.L.H. Bromine and iodine determination in active pharmaceutical ingredients by ICP-MS / A. L. H. Muller, P.A. Mello, F. Marcia et al. // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. – 2012. – Vol.27. – P. 1889–1894.
301. Nadal, M. Long-term environmental monitoring of persistent organic pollutants and metals in a chemical/petrochemical area: human health risks / M. Nadal, M. Schuhmacher, J.L. Domingo. – 2011. – Vol. 159, No. 7. – P. 1769–1777.
302. Nadkarni, R.A. Instrumental neutron activation analysis of tobacco products / R.A. Nadkarni, W.D. Ehmman // *NBC Sec Pub*. – 1969. – Vol. 312. – P. 190–196.
303. Nazer, I.K. Bromine residues in the soil and fruits of certain crops after soil fumigation with methyl bromide / I. K. Nazer, A. B. Hallak, W. L. Abu-Gharbieh et al. // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1982. – Vol. 74, No. 1. – P. 113–116.

- 304.Ntahokaja, W. A systematic neutron activation analysis of peat from Burundi / W. Ntahokaja, L. Zikovsky // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1995. – Vol. 199, No. 6. – P. 431–441.
- 305.Nyanza, E. C. Geophagy practices and the content of chemical elements in the soil eaten by pregnant women in artisanal and small scale gold mining communities in Tanzania // E. C. Nyanza, M. Joseph, S. S. Premji et al. // *BMC pregnancy and childbirth*. – 2014. – Vol.14, No. 1. – P. 144.
- 306.Pavelka, S. Effect of high bromide levels in the organism on the biological half-life of iodine in the rat / S.Pavelka, A. Babický, M. Vobecký, J. Lener // *Biological Trace Element Research*. – 2001. – Vol. 82, No.1–3 – P. 125–132.
- 307.Pavelka, S. Impact of high bromide intake in the rat dam on iodine transfer to the sucklings. / S.Pavelka, A. Babický, J. Lener, M. Vobecký // *Food and Chemical Toxicology*. – 2002. – Vol. 40, No.7 – P. 1041–1045.
- 308.Pehrsson, S. The role of trace elements in uremic heart failure / S. Pehrsson, L. Lins // *Nephron*. – 1983. – Vol. 34, No. 2. – P. 93–98.
- 309.Perminova, T. Methods for land use impact assessment: A review / T. Perminova, N. Sirina, B. Laratte, N. Baranovskaya, L. Rikhvanov // *Environmental Impact Assessment Review*. – 2016. – Vol.60. – P. 64–74.
- 310.Pourimani, R. Determining the amount of Br, Na and K in six wheat samples with neutron activation analysis (NAA) method in Arak, I.R. Iran / R. Pourimani, K. Abasnejad, K. Ghanbarzadeh et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2013. – Vol.295. – P. 163–166.
- 311.Querini, F. USEtox relevance as an impact indicator for automotive fuels. Application on diesel fuel, gasoline and hard coal electricity // F. Querini, S. Morel, V. Boch, P. Rousseaux // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. – 2011. – Vol. 16, No. 8. – 829 p.
- 312.Rojas, C.M. Aerosols in Santiago de Chili: a study using receptor modelling with X-ray fluorescence and single particle analysis / C.M. Rojas, P.Artaxo, R. Grieken // *Atmospheric Environment*. – 1990. – Vol. 24B, No. 2. – P. 227-241.
- 313.Rosenbaum, R.K. USEtox - The UNEP/SETAC-consensus model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment / R.K. Rosenbaum, T.M. Bachmann, L.S. Gold et al. // *The international journal of Life cycle assessment*. – 2008. – Vol. 13, No.7. – P. 532–546.
- 314.Rosenbaum, R.K. USEtox human exposure and toxicity factors for comparative assessment of toxic emissions in life cycle analysis: Sensitivity to key chemical properties / R.K. Rosenbaum, M.A.J. Huijbregts, A.D. Henderson et al. // *The international journal of Life cycle assessment*. – 2011. – Vol. 16, No.8. – P. 710–727.



315. Salma, I. Comprehensive characterisation of atmospheric aerosols in Budapest, Hungary: physicochemical properties of inorganic species / I. Salma, W. Maenhaut, E. Zemplén-Papp et al. // *Atmospheric Environment*. – 2001. – Vol. 35. – P. 4367-4378.
316. Santamouris, M. Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece / M. Santamouris, K. Paraponiaris, G. Mihalakakou // *Climatic Change*. – 2007. – Vol. 80, No. 3–4. – P. 265–276.
317. Sarita, P. Analysis of trace elements in blood sera of breast cancer patients by particle induced X-ray emission / P. Sarita, G.J. Naga Raju, A.S. Pradeep et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2012. – Vol. 294, No. 3. – P. 355–361.
318. Sarmani, S. Instrumental neutron activation analysis of kidney stones / S. Sarmani, L. L. Kuan, M. A. A. Bakar // *Biological Trace Element Research*. – 1990. – Vol. 26–27. – P. 497–502.
319. Sartori, M. The war gases : Chemistry and analysis / M. Sartori et al. – New York: D. Van. Nostrand Co., 1939. – 364 p.
320. Scheff, P. Characterization and source identification of respirable particulate matter in Athens, Greece / P.A. Scheff, C. Valiozis // *Atmospheric Environment*. – 1990. – Vol. 24A, No. 1. – P. 203–211.
321. Scheff, P. Toxic air pollutants in Chernivtsi, Ukraine / P. Scheff, R.A. Wadden, K.L. Ticho et al. // *Environmental International*. – 1997. – Vol. 23, No. 3. – P. 273-290.
322. Sendra, C. Material flow analysis adapted to an industrial area / C. Sendra, X. Gabarrell, T. Vicent // *Journal of Cleaner Production*. – 2007. – Vol. 15, No. 17. – P. 1706–1715.
323. Shacklette, H. T. Element Concentrations in Soils and Other Surface Materials of the Conterminous United States / H. T. Shacklette, J. G. Boerngen. – United States government printing office, Washington, 1984. – 63 p.
324. Shah, K. Determination of trace elements in petroleum by neutron activation analysis. Determination of Na, S, Cl, K, Ca, V, Mn, Cu, Ga and Br / K. Shah, R. Filby, W. Haller // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1970. – Vol. 6. – P. 185–192.
325. Shiraishi, K. Estimation of dietary iodine and bromine intakes of Ukrainians / K. Shiraishi, Y. Muramatsu, I.P. Los et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1999. – Vol. 242, No. 1. – P. 199–202.
326. Shouakar-Stash, O. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes, of the deep groundwaters of the Siberian Platform, Russia / O. Shouakar-Stash, S.V. Alexeev, S.K. Frapet et al. // *Applied Geochemistry*. – 2007. – Vol. 22. – P. 589–605.

327. Siche, J.R. Sustainability of nations by indices: comparative study between environmental sustainability index, ecological footprint and the energy performance indices / J.R. Siche, F. Agostinho, E. Ortega, A. Romeiro // *Ecological Economics*. – 2008. – Vol.66. – P. 628–637.
328. Smoydzin, L. Modelling chemistry over the Dead Sea: bromine and ozone chemistry / L. Smoydzin, R. Glasow // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2009. – Vol.9. – P. 5057–5072.
329. Stverak, B. Neutron activation analysis of trace elements in cataracts / B. Stverak, D. Tluchor, L. Ciganek // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1988. – Vol. 120, No. 2. – P. 345–352.
330. Suciú, N. Environmental and Human Risk Assessment of e-waste releases in China through USEtox / N. Suciú, M. Trevisan, E. Capri et al. // *In Risk-based management of chemicals and products in a circular economy at a global scale*. Dresden Universitat. – 2012. – P. 223–228.
331. Suh, S. Materials and energy flows in industry and ecosystem networks / S. Suh // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. – 2004. – Vol.9, No.5. – P. 335–336.
332. Tomza, U. Trace elements in head hair of hemodialysis patients / U. Tomza, W. Maenhaut // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters*. – 1984. – Vol.86, No. 4. – P. 209–220.
333. UNEP. Handbook for the international treaties for the protection of the ozone layer. Secretariat for The Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. – Nairobi, Kenya, 1996. – 305 p.
334. US Environmental Protection Agency OPPTS / Bromine Final Registration Review Decision Case 4015, 2010.
335. USEtox [Электронный ресурс]. URL: <http://www.usetox.org/> (Дата обращения: 06.03.2017).
336. Valdés, A. Elemental concentrations of ambient particles and cause specific mortality in Santiago, Chile: a time series study / A. Valdés, A. Zanobetti, J. Halone // *Environmental Health*. – 2012. – Vol. 11. – 82 p.
337. Van Dokkum, W. Minerals and trace elements in total diets in the Netherlands / W. Van Dokkum, R.H. De Vos, Th. Muys, J.A. Wesstra // *British Journal of Nutrition*. – 1989. – Vol.61. – P. 7–15.
338. Vassilev, S.V. Contents, modes of occurrence and origin of chlorine and bromine in coal / S.V. Vassiliev, G.M. Eskenazy, C.G. Vassileva // *Fuel*. – 2000. – Vol. 79. – P. 903-921.
339. Vobecky, M. Effect of increased bromide intake on iodine excretion in rats // M. Vobecky, A. Babicky, J. Lener // *Biological trace element research*. – 1996. – Vol. 55. – P. 215–219.
340. Waheed, S. Instrumental neutron activation analysis of 23 individual food articles from a high altitude region / S. Waheed, J.H. Zaidi, S. Ahmad // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2003. – Vol. 258, No. 1 – P. 73–81.

341. Ward, M. Trace element concentrations in blood plasma from diabetic patients and normal individuals / M.I. Ward, B. Pim // *Biological Trace Element Research*. – 1984. – Vol. 6, No. 6. – P. 469–487.
342. Ward, N. Elemental analysis of human placenta by neutron irradiation and gamma-ray spectrometry (standard, prompt and fast-neutron) / N. Ward, T. Macmahon, J. Mason // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1987. – Vol. 113, No. 2. – P. 501–514.
343. Wcisło, E. Human health risk assessment case study: an abandoned metal smelter site in Poland / E. Wcisło, D. Ioven, R. Kucharski, J. Szdzuj // *Chemosphere*. – 2002. – Vol.47, I.5. – P. 507–515.
344. Wei, B. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China / B. Wei, L. Yang // *Microchemical Journal*. – 2010. – Vol. 94, No. 2. – P. 99–107.
345. Westh, T.B. The USEtox story: A survey of model developer visions and user requirements / T.B. Westh, M.Z. Hauschild, M. Birkved et al. // *The international journal of Life cycle assessment*. – 2015. – Vol. 20, No.2. – P. 299–310.
346. WHO / World Health Organization technical report series. – WHO, 1971. – No.502.
347. Yatin, M. Trace element composition of atmospheric aerosols in Ankara, Turkey, determined by instrumental neutron activation analysis / M. Yatin, S. G. Tuncel, G. Tuncel // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1994. – Vol. 181, No. 2 – P. 401–411.
348. Yoffe, D. Bromine Compounds / D. Yoffe, R. Frim, S. Ukeles et al. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. – 2013. – 31 p.
349. Yuita, K. Iodine, bromine and chlorine contents in soils and plants of Japan / K. Yuita // *Soil Science and Plant Nutrition*. – 1983. – Vol. 29. – P. 403–428.
350. Zaichick, S. The effect of age and gender on 37 chemical element contents in scalp hair of healthy humans / S. Zaichick, V. Zaichick // *Biological trace element research*. – 2010. – Vol. 134, No. 1. – P. 41–54.
351. Zheng, J. Activation analysis study on subcellular distribution of trace elements in human brain tumor / J. Zheng, G. Zhuang, Y. Wang et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1992. – Vol. 166, No. 2. – P. 97–107.
352. Zikovskiy, L. An indirect study of air pollution by neutron activation analysis of snow / L. Zikovskiy // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1986. – Vol. 114, No. 1. – P. 147–153.
353. Zhuk, L.I. Elemental blood composition of the inhabitants of Uzbekistan / L.I. Zhuk, A.A. Kist, I.N. Mikholskaya et al. // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*. – 1988. – Vol.120, No. 2. – P. 369–377.
354. Zhuk, L.I. Human hair instrumental neutron activation analysis and medicine / L.I.Zhuk, A.A. Kist // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1995. – Vol. 195, No. 1. – P. 75–81.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А

Таблица 1 – Разделение населенных пунктов Томского района по зонам и секторам

Зоны и сектора		Населенные пункты
< 30 км		Рассвет, Конинино, Заречный, Семилужки, Наумовка, Георгиевка, Малиновка, Молодежный, Северск, Кижирово, Моряковский Затон, Самусь, Орловка, Зональная станция, Лучаново, Богашево, Лоскутово, Кузовлево, Светлый, Копылово, Воронино, Корнилово, Томск, Кисловка, Тахтамышево, Тимирязево, Черная речка, Барабинка, Кафтанчиково, Губино, Нелюбино, Поросино, Петрово, Рыбалово, Зоркальцево, Дзержинское, Березкино
> 30 км		Октябрьское, Халдеево, Новоархангельское, Турунтаево, Александровское, Половинка, Козюлино, Вершинино, Межениновка, Петухово, Калтай, Кандинка, Верхнее Сеченово, Черная речка (Юкса), Новорождественское, Мазалово, Киреевск, Итатка, Ольговка
< 30 км	СВ	Рассвет, Конинино, Заречный, Семилужки, Наумовка, Георгиевка, Малиновка, Молодежный
	СЗ	Северск, Кижирово, Моряковский Затон, Самусь, Орловка
	ЮВ	Зональная станция, Лучаново, Богашево, Лоскутово, Кузовлево, Светлый, Копылово, Воронино, Корнилово, Томск
	ЮЗ	Кисловка, Тахтамышево, Тимирязево, Черная речка, Барабинка, Кафтанчиково, Губино, Нелюбино, Поросино, Петрово, Рыбалово, Зоркальцево, Дзержинское, Березкино
> 30 км	СВ	Октябрьское, Халдеево, Новоархангельское, Турунтаево, Александровское, Черная речка (Юкса), Итатка, Ольговка
	СЗ	Половинка, Козюлино
	ЮВ	Вершинино, Межениновка, Петухово, Новорождественское, Мазалово
	ЮЗ	Калтай, Кандинка, Верхнее Сеченово, Киреевск

Примечание: измерение расстояний проводилось с помощью программы Google my maps

Таблица 1 – Разделение земного шара на континентальные зоны согласно USEtox

№	Зона	Описание
1	Северная Америка	Включает 10 субконтинентальную зону
2	Латинская Америка	Включает 7, 8 и 9 субконтинентальные зоны
3	Европа	Включает 13 субконтинентальную зону
4	Африка + Ближний Восток	Включает 5 и 6 субконтинентальные зоны
5	Центральная Азия	Включает 1 субконтинентальную зону
6	Юго-Восточная Азия	Включает 2, 14, 15, 16, 17 субконтинентальные зоны
7	Северные регионы	Включает 12 субконтинентальную зону
8	Океания	Включает 3 и 4 субконтинентальные зоны

Таблица 2 – Разделение земного шара на субконтинентальные зоны согласно USEtox

№	Зона	Описание
1	Центральная Азия	Россия, Афганистан, Иран, Казахстан, Киргизия, Монголия, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан, Западный Китай
2	Индокитай	Бруней–Даруссалам, Камбоджа, Лаос, Малайзия, Мальдивы, Мьянма, Филиппины, Сингапур, Таиланд, Вьетнам, Индонезия
3	Северная Австралия	Австралия, о-ва Уоллис и Футуна
4	Южная Австралия и Новая Зеландия	Австралия, Новая Зеландия
5	Южная Африка	Ангола, Ботсвана, Коморские Острова, Лесото, Мадагаскар, Малави, Маврикий, Мозамбик, Намибия, Руанда, Реюньон, Южная Африка, Свазиленд, Объединенная Республика Танзания, Замбия, Зимбабве, Демократическая Республика Конго, Конго, Габон, Кения, Уганда, о. Святой Елены, Сейшельские острова

6	Северная, Южная, Западная и Центральная Африка	Демократическая Республика Конго, Конго, Габон, Кения, Уганда, Алжир, Бахрейн, Бенин, Буркина-Фасо, Бурунди, Камерун, Кабо-Верде, Центральная Африканская Республика, Чад, Кот-д'Ивуар, Джибути, Египет, Эритрея, Эфиопия, Гамбия, Гана, Гвинея, Гвинея-Бисау, Ирак, Израиль, Иордания, Кувейт, Ливан, Либерия, Ливийская Арабская Джамахирия, Мали, Мавритании, Марокко, Нигер, Нигерия, Оман, оккупированные палестинские территории, Катар, Демократическая Республика Сан-Томе и Принсипи, Саудовская Аравия, Сенегал, Сьерра-Леоне, Судан, Сирийская Арабская Республика, Того, Тунис, Объединенные Арабские Эмираты, Западная Сахара, Йемен, Экваториальная Гвинея, Сомали
7	Аргентина+	Аргентина, Чили, Фолклендские (Мальвинские) острова, Парагвай, Уругвай
8	Бразилия+	Боливия, Перу, большая часть Бразилии, Колумбия, южная часть Эквадора
9	Центральная Америка и Карибы	Ангилья, Антигуа и Барбуда, Аруба, Багамские Острова, Барбадос, Белиз, Бермуды, Британские Виргинские острова, Каймановы острова, Коста-Рика, Куба, Доминика, Доминиканская Республика, Сальвадор, Французская Гвиана, Гренада, Гваделупа, Гватемала, Гайана, Гаити, Гондурас, Ямайка, о. Мартиника Мексика, о. Монтсеррат, Нидерландские Антильские острова, Никарагуа, Панама, Пуэрто-Рико, Сент-Китс и Невис, Сент-Люсия, Сент-Пьер и Микелон, Сент-Винсент и Гренадины, Суринам, Тринидад и Тобаго, о-ва Теркс и Кайкос, Американские Виргинские острова, Венесуэла (Боливарианская Республика Венесуэла), часть Бразилии, Колумбия, север Эквадора
10	США и Южная Канада	Южная Канада, США (кроме Аляски)
11	Антарктика	–
12	Северная Европа и Северная Канада	Аляска, Гренландия, Исландия, Финляндия, северная часть Канады, Норвегия, Швеция, Россия
13	Европа	Италия, Латвия, Лихтенштейн, Литва, Люксембург, Македония, Мальта, Молдова, Монако, Нидерланды, Польша, Португалия, Румыния, Сан-Марино, Сербия, Словакия, Словения, Испания, Швейцария, Турция, Украина, Великобритания; южная часть Норвегии, Швеция, Россия
14	Ост-Индия и страны Тихоокеанского региона	Индонезия, Американское Самоа, о-ва Кука, Фиджи, Французская Полинезия, о. Гуам, Кирибати, Маршалловы о-ва, Микронезия (Науру, Новая Каледония, Ниуэ, о-ва Северной Марианны, Палау, Папуа–Новая Гвинея, Самоа, Соломоновы Острова, Тимор-Лешти, Токелау, Тонга, Тувалу, Вануату
15	Индия	Индия, Бангладеш, Бутан, Непал, Пакистан, Шри-Ланка
16	Восточный Китай	Восточный Китай, Гонконг (Сянган)
17	Япония и Корейский полуостров	Япония, Северная Корея, Южная Корея