

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Барановская Анна Юрьевна

**ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ СЕМЕЙСТВА РЯСКОВЫЕ
(LEMNACEAE) КАК ИНДИКАТОР ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.21. Геоэкология

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Барановская Наталья Владимировна

доктор биологических наук, профессор,
профессор отделения геологии Инженерной
школы природных ресурсов Томского
политехнического университета

Официальные оппоненты:

Страховенко Вера Дмитриевна

доктор геолого – минералогических наук,
профессор, профессор кафедры минералогии и
геохимии геолого – геофизического факультета
ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный
исследовательский государственный
университет», в.н.с. ФГБУН Институт геологии и
минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Курашов Евгений Александрович

доктор биологических наук, главный научный
сотрудник ФГБУН Институт биологии
внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской
академии наук

Защита состоится 06 ноября 2025г в 10-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.29 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.29
д.б.н., профессор Барановская Н.В.

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to N.V. Baranovskaya.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Одной из актуальных проблем геоэкологии и экогеохимии является поиск индикаторов состояния окружающей среды, характеризующихся универсальностью, объективностью оценки и высокой степенью встречаемости в различных природно-климатических районах (Никаноров и Жулидов, 1991; Рихванов и др., 2006; Ивашов и Пан, 2007; Барановская и др., 2011; Кургаева и Климентова, 2014). Особое внимание уделяется поиску биогеоиндикаторов, которые более чувствительны к другим компонентам природной среды, а также отражают степень влияния эколого-геохимических обстановок территорий на живой организм. Поиск подобных индикаторов особенно необходим для селитебных территорий, для которых характерен высокий уровень техногенного влияния.

Растения семейства рясковые (*Lemnaceae*) являются уникальным объектом, который нашел свое применение в фундаментальных и в прикладных науках. Фундаментальные основы по изучению биогеохимической специфики и биоаккумуляционной способности данного макрофита заложены в трудах ученых прошлого столетия (Вернадский В.И., А.П. Виноградов и других организаторов и участников лаборатории БИОГЕЛ (ныне Отдел живого вещества ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского).

Возможность практического применения растений семейства рясковые изучается учеными разных стран (СНГ, Россия, США и другие) с получением патентов на использование их в качестве биодобавок в агротехнике, биоремедиаторов, биотоплива и в других областях (Axtell et al., 2003; Mkandawire et al., 2004, 2005; Sasmaza, Obek, 2009; Sobrino et al., 2010; Favas et al., 2012; Varga M et al., 2013; Sasmaz et al., 2015; Yahaya N. et al, 2022).

Рясковые имеют повсеместное распространение и отличаются простым морфологическим строением (Landolt, 1987), что делает их устойчивыми с точки зрения влияния широкого спектра факторов и условий среды. Рядом исследователей установлена высокая концентрационная способность растений по отношению к большинству химических веществ, что позволяет применять их для очистки сточных вод (Favas et al., 2016; Sasmaz et al., 2016; Ekperusi et al., 2019). Рясковые отличаются способностью реагировать на изменение эколого-геохимического состояния окружающей среды посредством изменения собственного элементного состава в широких интервалах значений. К важнейшим особенностям данного биогеоиндикатора относится произрастание на контакте двух сред «вода-воздух» (Favas et al., 2016; Ceschin S., et al., 2016).

В настоящий момент растения семейства рясковые активно используются в области биотестирования и экотоксикологии (Mkandawire et al., 2014; Bocuk et al., 2013; Basiglini et al,

2018; Ceschin et al., 2020; Ekperusi et al., 2020). Внимание большинства исследователей занимает прикладная специализация аккумуляционных способностей водных растений, использование их в качестве фиторемедиаторов сточных вод (Varga et al., 2013; Rofkar et al., 2014; Sasmaz et al., 2016, 2018). При этом работы по изучению индикаторных свойств элементного состава рясковых немногочисленны и требуют особенного внимания, исходя из высокой перспективности данных растений в области биогеохимической индикации и геоэкологического мониторинга.

Изучение характера поступления элементов в объект геоэкологического мониторинга становится особенно актуальным на территориях с разноплановым и многокомпонентным техногенным воздействием, ярким примером которых является территория России, характеризующаяся разнообразием эколого-геохимических и геологических обстановок.

Растения семейства рясковые, являясь космополитом, имеют широкий ареал произрастания, в том числе и на территории селитебных зон России, представляющих наибольшую значимость при геоэкологическом мониторинге. Изучение элементного состава рясковых на территории селитебных районов страны решает ряд актуальных проблем геоэкологии: поиск универсального биогеоиндикатора и определение средних концентраций химических элементов в рясковых для дальнейшего мониторинга.

Кроме того, изучение элементного состава данного растения представляет интерес с точки зрения его существования на границах водной и воздушной среды в качестве фундаментальной проблематики исследования.

Цель работы: установить индикаторные показатели накопления химических элементов в составе растений семейства рясковые (*Lemnaceae*) для применения в районировании территории с разными эколого-геохимическими обстановками.

Задачи исследований:

1. Определить содержание и распределение макро-, микро-, радиоактивных и редкоземельных элементов в растениях семейства рясковые из разных мест произрастания; выявить элементы-индикаторы природного и техногенного воздействия.

2. Установить зависимость элементного состава растений семейства рясковые в зависимости от типа вод, где они произрастают (натриевые и кальциевые); выявить преимущественный источник поступления (водный, атмосферный) химических элементов в растения семейства рясковые.

3. Выделить региональную геохимическую специализацию растений семейства рясковых на территории Томской области.

Основные защищаемые положения:

1. Содержание макроэлементов (Na, Ca, Mg) и их микроминеральных фаз в растениях семейства рясковые отражает тип вод (натриевый и кальциевый). Эоловый привнос влияет на содержание тория и редкоземельных элементов и их отношений в системе «рясковые – вода – донные отложения».

2. Микроэлементный и микроминеральнофазовый состав рясковых является индикатором природно-техногенной составляющей зон сноса селитебных территорий Российской Федерации.

Среднегеометрические значения 29 химических элементов в растениях семейства рясковые водоемов селитебных районов Российской Федерации являются реперными показателями для оценки эколого-геохимического состояния территорий.

3. Рясковые водоемы районов Томской области с высоким развитием нефтедобывающего комплекса характеризуются наличием специфичной ассоциации элементов (Cr, Sb, Br, As, Ta, U); районов активного развития агропромышленного комплекса - калия и фосфора; районов ядерно-топливного цикла - концентрированием урана и лютетия и их локальным распределением, а также изменением отношений Th/U (<2) и Br/U (<10).

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положены образцы проб растений семейства рясковые в воздушно-сухом и озоленном состоянии, воды, донных отложений и водной взвеси.

Фактический материал собран и обработан в период с 2014 по 2021 гг. преимущественно автором лично. В отборе некоторых проб оказана помощь жителям отдельных регионов РФ, а также сотрудников Томского политехнического университета и Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Всего отобрано 396 проб рясковых, произраставших на селитебных территориях Российской Федерации.

Основная выборка населенных пунктов представляет селитебные территории, в состав которых входят города, поселки городского типа или близко расположенные к городам, районные центры с населением более 2000 чел. Исключение составляют три населенных пункта (д. Вехручей (Респ. Карелия), д. Якшино (Тульская обл.), п. Юган (Респ. Татарстан)), не подходящие под вышеобозначенные характеристики. В каждом населенном пункте осуществлялся отбор проб не менее чем из 2-4 водоемов.

Для установления связи в системе «вода – рясковые – донные отложения» дополнительно были отобраны пробы воды и донных отложений в количестве 24 и 14 соответственно.

Отбор проб рясковых осуществлялся в соответствии с ГОСТ 31413-2010.

Отбор образцов воды производился в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51592-2000, ГОСТ 31942-2012.

Пробы донных отложений отбирались по стандартной методике ГОСТ Р 54519-2011.

Основным аналитическим методом для определения элементного состава сухого вещества растений семейства рясковые являлся инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), выполненный на базе ядерно-геохимической лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» (аналитики – с.н.с. А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская).

Для установления особенностей поведения химических элементов в системе «вода-рясковые-донные отложения» элементный состав исследуемых сред определялся с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, выполненной на базе Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета (заведующая лабораторией – к.г.-м.н, доцент А.А. Хвощевская).

С использованием анализатора «РА-915+» (Россия) с приставкой «ПИРО-915+» методом атомно-абсорбционной спектрометрии определено валовое содержание ртути в сухом веществе рясковых на базе Международного научно-образовательного центра «Урановая геология» Национального исследовательского Томского политехнического университета (консультант – к.х.н. Н.А. Осипова).

Отдельные аномальные по содержанию химических элементов пробы рясковых изучались на сканирующем электронном микроскопе Hitachi-3400N с энергодисперсионной приставкой для микроанализа (лаборатория электронно-микроскопической диагностики МИНОЦ «Урановая геология», аналитик – к.г.-м.н., старший преподаватель С.С. Ильенок).

Обработка полученных результатов исследования элементного состава рясковых осуществлялась с помощью ПО MS Office («Word», «Exel»), «Statistica 8.0», графическая обработка проводилась с помощью ПО «Surfer», «CorelDRAW», а также ADOBE Photoshop.

Научная новизна. Установлены региональные особенности элементного состава исследуемых растений на территории районов Томской области.

Выявлены особенности распределения химических элементов в системе «вода – рясковые – донные отложения» для водоемов Сибирского региона с разным типом вод (водоемы территорий Томской и Новосибирской областей).

Впервые установлены и применены для районирования территорий индикаторные отношения химических элементов (Th/U, La/Ce, Br/U) в составе рясковых на территории восьми федеральных округов Российской Федерации. Установлены закономерности формирования

элементного и микроминерального фазового состава растений в зависимости от металлогенических и техногенных условий регионов.

Выявлены элементы-индикаторы техногенных обстановок территории Томской области, связанных с деятельностью предприятий ядерно-топливного, агропромышленного и нефтегазодобывающего комплексов.

Впервые проведено геоэкологическое картирование территорий согласно выявленной на ней специфике формирования элементного состава рясковых.

Практическая значимость. Предложены для практического использования средние содержания химических элементов в рясковых на территории селитебных районов Российской Федерации, которые могут применяться при геоэкологической оценке и районировании территорий с различной эколого-геохимической ситуацией.

Материалы, полученные в процессе выполнения работы, используются при проведении занятий по курсам «Геоэкологический мониторинг», «Геохимия живого вещества», а также при написании курсовых и дипломных работ студентами.

Полученные материалы по районированию отдельных селитебных районов по содержанию химических элементов в составе рясковых могут быть полезны природоохранным службам и применяться в качестве дополнительной информации в прикладной геологии.

Достоверность защищаемых положений обеспечена использованием современных концептуальных, теоретических, методических подходов и принципов биогеохимии и геоэкологии, обширным фактическим материалом, полученным прецизионными методами в аккредитованных лабораториях по аттестованным методикам, с использованием статистических методов обработки аналитических данных, апробацией результатов работы в среде научно-производственной общественности на научных симпозиумах, конференциях, семинарах и публикацией результатов в рецензируемых периодических изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК Минобрнауки России, и индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и (или) Web of Science.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на международных и всероссийских научных симпозиумах, конференциях и конкурсах: XXXI Молодёжная научная школа-конференция памяти К.О. Кратца (Санкт-Петербург, 2020 г.); XII Международная биогеохимическая школа-конференция «Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине» (Тула, 2021 г.); VI Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (Томск, 2021 г.); XXV Международная

экологическая студенческая конференция (Новосибирск, 2022 г.); XXVII Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2023 г.); Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых "Современные направления развития геохимии" (Иркутск, 2023 г.); XIII Международная биогеохимическая школа (Пущино, 2023 г.).

Публикации. Общее количество публикаций по теме составляет 25 статей. Основные научные результаты опубликованы в 4 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, из которых 3 – опубликованы в журналах, которые индексируются в базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 165 страницах, включает 94 рисунка и 24 таблицы. Работа содержит 5 глав, введение, заключение, список литературы включает 182 источников.

В первой главе рассматриваются общая характеристика растений семейства рясковые, специфика формирования их элементного состава и степень его изученности с точки зрения индикации территории произрастания. **Вторая глава** посвящена описанию методов отбора и подготовки проб, проведения аналитических исследований и обработки результатов. **В третьей главе** описаны средние значения некоторых элементов в рясковых селитебных территориях Российской Федерации и закономерности формирования элементного состава исследуемых растений в данных условиях. **В четвертой главе** приведены региональные особенности распределения и накопления исследуемых элементов в рясковых на территории Томской области. **В пятой главе** приведены работы по изучению закономерности изменения элементного состава рясковых в зависимости от гидрогеохимических и литогеохимических параметров среды. В заключении приводятся основные выводы по работе.

Личный вклад. В основу диссертационной работы положены материалы полевых, лабораторных и камеральных работ, проведенных в период с 2013 по 2023 гг. лично автором и совместно с сотрудниками отделения геологии Томского политехнического университета, а также в сотрудничестве с коллегами из Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Пробоподготовка осуществлялась автором в лабораториях отделения геологии ТПУ. Осуществлен анализ полученных данных, совместно с научным руководителем проведено обсуждение полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, установлена научная новизна и практическая значимость. Автором сформулированы задачи, которые полностью выполнены в ходе подготовки диссертации, разработаны научные рекомендации, высказанные в ходе изложения материала диссертации.

Диссертация написана самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Благодарности. Автор выражает особую признательность и благодарность научному руководителю, профессору, д.б.н. Барановской Наталье Владимировне за ценные советы, поддержку во всех начинаниях и научное руководство. Автор выражает благодарность д.г.-м.н., профессору Рихванову Л.П., д.б.н., д.г.-м.н., профессору Арбузову С.И., д.г.-м.н., профессору Языкову Е.Г., д.г.-м.н., доценту Юсупову Д.В., к.г.-м.н., ассистенту Ильенку С.С. и к.х.н. Осиповой Н.А. за консультации в выполнении работы. Благодарим Капитонову О.А., старшего научного сотрудника, д.б.н. за выполнение работ по родовой и видовой идентификации отобранных проб водных растений. Автор признательна за помощь в отборе проб сотрудникам отделения геологии ИШПР ТПУ и Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева. Также автор благодарен всем, кто бескорыстно помог в сборе материала: Стрюк Надежде (г. Воронеж), Каримову Дмитрию (г. Бор), Тарасову Александру (г. Коломна), Федосовой Кристине (г. Москва), Зориной Анастасии (г. Кирово-Чепецк), Денисовой Дарье (г. Орел), Марущак Федору (г. Москва), Кудимову Антоу (г. Саранск), Монаховой Екатерине (г. Омск), Торговкину Николаю (Якутск), Сороке Анастасии (г. Тайшет), Шилениной Агате (г. Бийск), Шангину Никите (г. Санкт-Петербург), Михайловой Екатерине (г. Екатеринбург), Шатиафу Павлу (г. Партизанск), Кондратьевой Анне (г. Псков), Механтьеву Евгению (г. Новосибирск), Дзугеву Заурбеку (г. Владикавказ), Воробьевой Анастасии (г. Владимир), Мартыновой Ольге и ее ученикам (г. Мосальск) и многим другим, кто не остался равнодушен к научной работе.

Отдельную благодарность автор хочет выразить своим родным и близким за поддержку и веру в течение всех лет обучения, проведения исследований и написания научно-квалификационной работы.

Защищаемые положения

ПОЛОЖЕНИЕ 1. *Содержание макроэлементов (Na, Ca, Mg) и их микроминеральных фаз в растениях семейства рясковые отражает тип вод (натриевый и кальциевый). Эоловый привнос влияет на содержание тория и редкоземельных элементов и их отношений в системе «рясковые – вода – донные отложения».*

На территории Западной Сибири в Новосибирской и Томской областях нами были проведены работы по изучению системы «вода – ряска – донные отложения» для 24 водоемов.

Согласно классификации О.А. Алекина (1970) исследуемые водоемы Новосибирской области характеризуются наличием вод следующих типов: хлоридно-гидрокарбонатная

кальциево-магниево-натриевая (12%); хлоридно-гидрокарбонатная натриевая (33%); гидрокарбонатно-хлоридная натриевая (33%); гидрокарбонатно-хлоридная натриевая (22%).

В то время как исследуемые водоемы Томской области характеризуются наличием таких типов вод, как гидрокарбонатная кальциевая (73%), гидрокарбонатная кальциево-магниевая (20%), гидрокарбонатная кальциево-магниево-натриевая (7%).

В рамках данной работы, водоемы Новосибирской области охарактеризованы как водоемы с натриевым типом вод, Томской области как водоемы с кальциевым типом. Данное определение дано с учетом преобладающих во всех пробах вод Новосибирского области катиона – натрия, а в пробах Томской области – кальция.

Выполнено сравнение характера концентрирования элементов исследуемым макрофитом водоемов с различным типом вод (кальциевым и натриевым).

Относительно макрокомпонентов, для рясковых водоемов с натриевым типом вод характерно концентрирование Na, в то время как для рясковых кальциевых вод Ca.

Продемонстрированный на рисунке 1А характер накопления натрия в системе «вода-ряска» показывает прямую корреляцию с водоемами, характеризующихся натриевым типом вод при отсутствии таковой для кальциевых. Обратная картина наблюдается при рассмотрении концентрирований кальция (Рисунок 1Б).

Таким образом, ведущие катионы имеют одинаковые тенденции в изменении содержания как в воде, так и растениях, что позволяет говорить о прямом участии воды в формировании макроэлементного состава рясковых, т.е. влиянии ее гидрогеохимических особенностей.

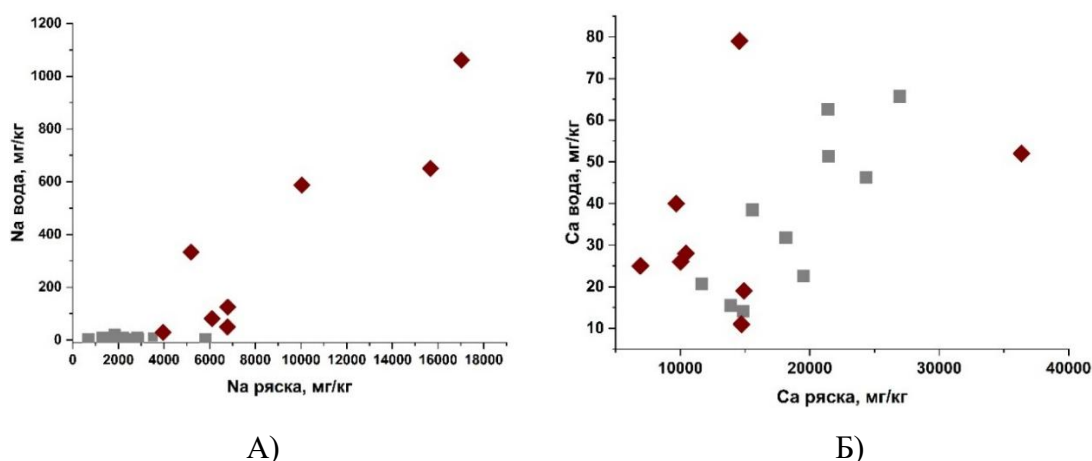


Рисунок 1. Зависимость содержания Na (А), Ca (Б) в рясковых от типа вод (натриевые – «бордовый ромб» и кальциевые – «серый квадрат»)

В водоемах с кальциевым типом вод для рясковых характерным является кальцинирование устьиц листеца. (Рисунок 2 (А)). При изучении специфики микроминеральнофазового состава растений водоемов с натриевым типом вод наблюдается картина дисперсного распределения натрия по поверхности листеца растения (Рисунок 2 (Б)).

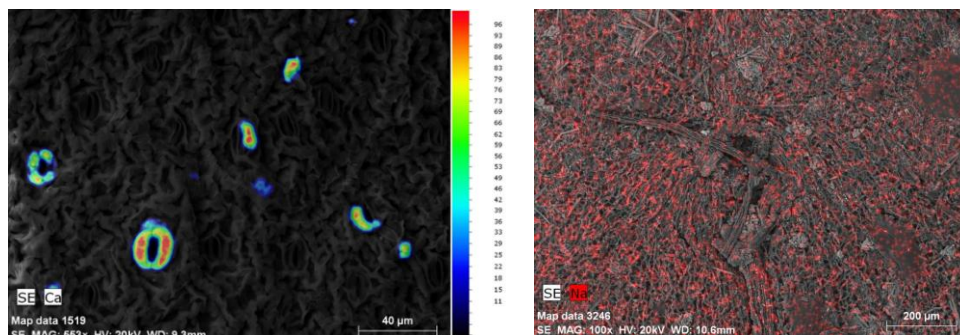


Рисунок 2 - Микроминеральный состав рясовых (EDS – спектры) водоемов с кальциевым типом вод (А) и дисперсное распределение Na в рясовых водоемов с натриевым типом вод (Б)

При рассмотрении характера содержания некоторых групп микро – и ультрамикроэлементов мы выявили тот факт, что их содержание не соотносится с таковым в водах изученных водоемов. Это может объясняться их эоловым привносом, что хорошо продемонстрировано в работах В.Д. Страховенко (2011, 2017) по формированию донных отложений изучаемого региона.

Выявлено, что содержание Th, Eu, La и Ce в рясовых не коррелируют с содержанием данных элементов в воде (Рисунок 3, Рисунок 4). Это свидетельствует о поступлении Th, Eu, La и Ce преимущественно с эоловыми процессами.

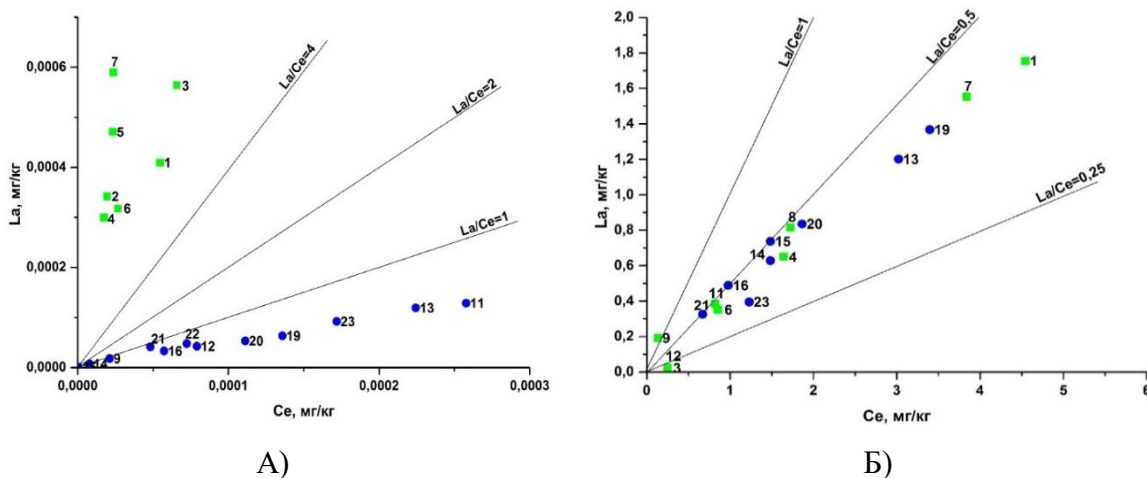


Рисунок 3 - Соотношение La/Ce в содовых водах (зеленый квадрат) и кальциевых водах (синий ромб) и в семействе рясовых (сухое вещество) содовых водоемов (зеленый квадрат) и кальциевых (синий ромб):

1 – Пресное; 2 – Цыбово; 3 - Бол, Кайлы; 4 – Чистое; 5 – Барчин; 6 – Мостовое; 7 – Песчаное; 8 - Жилое К; 9 - Шиняево; 10 - Гагарино; 11 - Вамбалы; 12 - Беловодовка; 13 - Шияново; 14 - Новокусово; 15 - Караколь; 16 - Десятово; 17 - Ерестная; 18 - Кривошеино; 19 - Соколовка; 20 – Жарковка (заводь р.Карлыгач); 21 - Чажемто; 22 – Осиновка (заводь р. Кумлова); 23 – Тимирязевское (оз. Песчанное)

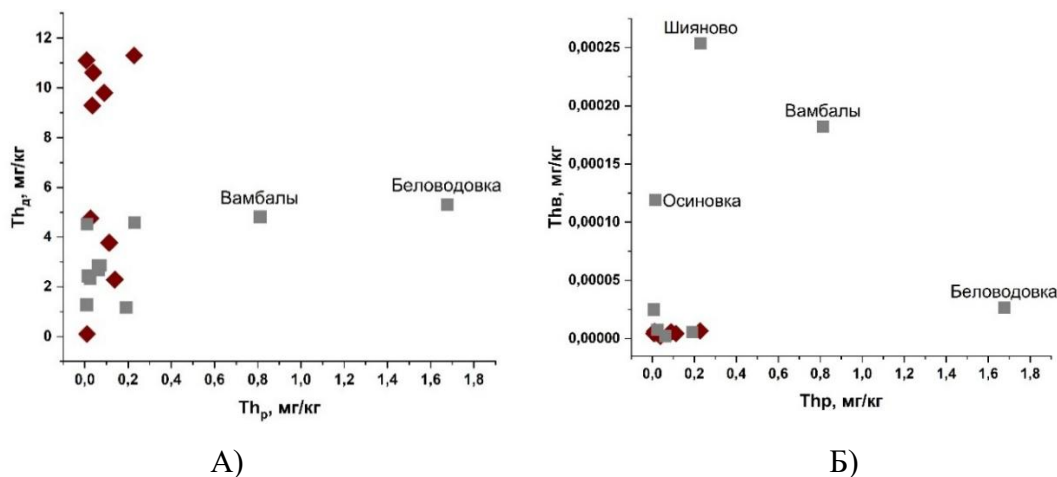


Рисунок 4 - Соотношение тория в системе «рясковые – донные» (А) и «рясковые – вода» (Б) в водоемах с натриевым (ромб) и кальциевым (квадрат) типами вод

Согласно работам многих авторов, вода является основным источником поступления элементов в растения (Landolt, Kandeler, 1987; Vosuk et al, 2013; Sasmaz et al, 2016). Но полученные нами результаты демонстрируют высокую долю влияния эолового привноса, сорбцию пыли фитомассой. Так для Th, Eu, La и Се прослеживается практически прямая зависимость их содержаний в рясковых от зольности. Полученные результаты могут еще раз подтвердить основной источник их поступления - эоловый привнос (Рисунок 6).

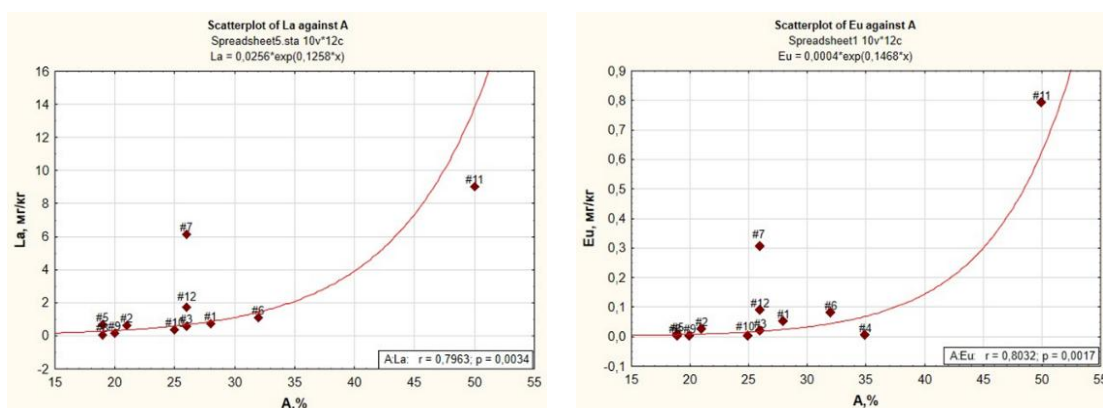


Рисунок 6 - Зависимость содержания La, Eu в рясковых от зольности:

1 - Черная речка; 2 - Большая Саровка, 3 – Ягодное, 4 - Кожевниково, 5 - Жарковка (р. Карлыгач), 6 - Осиновка, 7 - Боровое озеро, 8 - Асино (пр. Чулыма), 9 - 16 км. от Стрежевого, 10 - Малиновка, 11 - около Высокого Яра (Бакчарский район), 12 - Надежда (Томский район)

Выше установленные факты, говорят о свойстве расковых отражать комплексный характер поступления химических элементов, что позволяет говорить о возможности его использования в качестве геоиндикатора эколого – геохимических обстановок территорий.

ПОЛОЖЕНИЕ 2.

Микроэлементный и микроминеральнофазовый состав рясковых является индикатором природно-техногенной составляющей зон сноса селитебных территорий Российской Федерации.

Среднегеометрические значения 29 химических элементов в растениях семейства рясковые водоемов селитебных районов Российской Федерации являются реперными показателями для оценки эколого-геохимического состояния территорий.

Методами ИНАА определено среднее содержание и диапазон минимально-максимального разброса 28 химических элементов (Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Th, U) в водных растениях семейства рясковые (*Lemnaceae*) из 221 водоема на территории селитебных районов восьми Федеральных округов России (Рисунок 7)

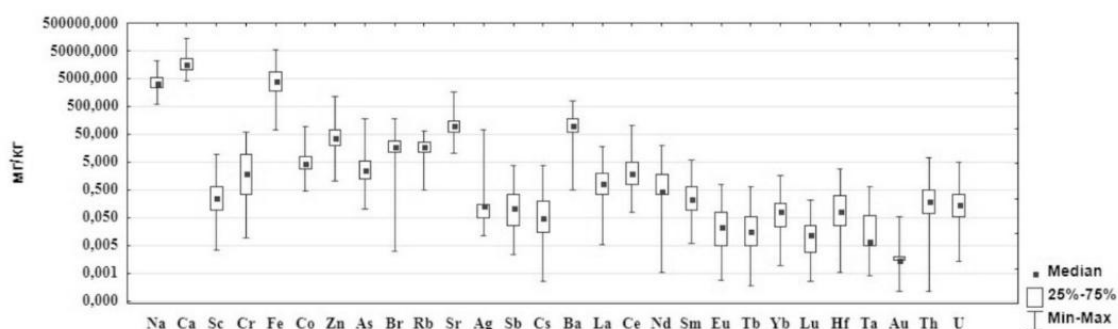


Рисунок 7 - Интервалы разброса и среднее содержание химических элементов в сухом веществе растений семейства рясковые на территории селитебных районов Российской Федерации (мг/кг)

Данная работа была нами выполнена с целью решения одной из главных проблем геоэкологических и эко-геохимических исследований, поиск реперных значений, которые имеют ведущую роль в объективности интерпретации данных по элементному составу индикаторов.

На сегодня, такие реперы для рясковых на территории России отсутствуют. На международном уровне существуют данные только по узкому спектру элементов в растениях различных авторов. Самый широкий спектр принадлежит Landolt and Kandeler (1987).

Принимая во внимание ранее полученные нами данные об отличии элементного состава рясковых восьми Федеральных округов России, в качестве репера мы предлагаем использование среднего геометрического содержания химических элементов в рясковых селитебных районах России (Барановская и др., 2023) с целью дальнейшего районирования территории по интенсивности природно-техногенного воздействия.

Установлено, что содержание всех исследуемых элементов в макрофите отличается неоднородностью распределения на территории, что может говорить о высокой степени чувствительности данных растений к геохимической вариативности среды природного и техногенного характера (Юсупов и др., 2019; Арбузов и Рихванов, 2009; Злобина и др., 2019).

Нами выявлено, что Fe, Au, Ba, Ag и Ca специфичные элементы для рясковых, и характеризуются значениями выше кларковых (по Глазовский, 1982) вне зависимости от региона.

Одновременно в районах потенциальных в отношении наличия железорудных месторождений Fe встречается в рясовых в виде специфичных микроминеральных фаз (п. Туим, г. Магнитогорск).

Основной спектр сорбируемых макрофитом элементов отражает природно-техногенную ситуацию территории, что подтверждается при соотношении элементного состава рясовых с литогеохимической обстановкой исследуемой территории.

По Смыслову (1995) имеется геохимическая карта России, которая позволила нам выявить существенную зависимость элементного состава рясовых от металлогении района ее произрастания.

Нами выполнен расчет соотношений содержаний суммы элементов в рясовых с геохимической характеристикой структурно-формационных комплексов исследуемой территории. Установлено, что в элементном составе растения преобладает группа металлов соответствующая метало-геохимической обстановки района (Рисунок 8).

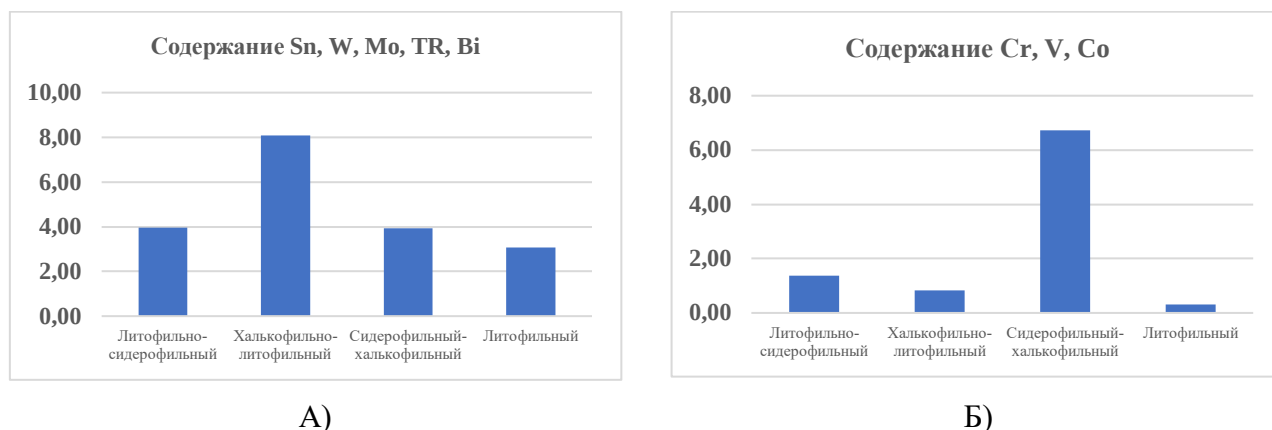


Рисунок 8 - Кк относительно кларка ноосферы (Глазовский, 1982) группы литофильных элементов (Sn, W, Mo, TR, Bi) (А) и группы сидерофильных элементов (Cr, V, Co) (Б) в рясовых в зависимости от района произрастания

Детализация по районам произрастания показала, что элементный и микроминерально-фазовый состав рясовых напрямую отражает природные аномалии.

Установлено, что при анализе пространственного распределения содержания Fe в рясовых на территории селитебных районов России, четко прослеживается рост концентраций элемента с запада на восток, что соотносится с расположением железорудных провинций на исследуемой территории.

Примером являются аномальные концентрации Fe в рясовых на территории Республики Хакасия, в заводи р. Карыш. Данный участок расположен в Шипилинско-Карышском железорудном районе и отличается крупным ресурсным потенциалом в отношении Fe (Веселов, 2003) (Рисунок 9).



Рисунок 9 - Фрагмент карты полезных ископаемых Алтае-Саянская серии (Махлаев и др., 2005)

Такие же аномалии Fe нами зафиксированы в районе Уральского округа в рясковых г.Магнитогорск, где обнаружена высокая частота встречаемости минеральных железосодержащих микросферул, характеризующиеся различным диаметром (Рисунок 10).

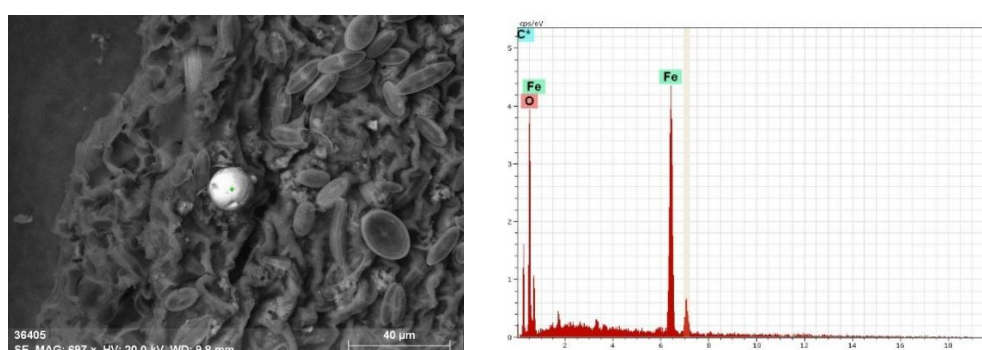


Рисунок 10 - Снимок и энерго-дисперсионный спектр микросферул на поверхности рясковых (г.Магнитогорск)

Выявлена выраженная дифференциация по концентрированию редкоземельных элементов (РЗЭ) в рясковых: Европейская часть России характеризуется преимущественно низкими значениями РЗЭ, в то время как Уральский, Сибирский и Дальневосточный округа характеризуются повышенными концентрациями РЗЭ в рясковых относительно выявленных реперных показателей.

Другим примером индикации природных аномалий служит содержание Sb в макрофите, отличающаяся низкой вариативностью, за исключением районов, имеющих потенциальные источники ее поступления, к которым относится территория расположения Газимурского Завода (Забайкальский край), где концентрации Sb в рясковых превышают средние показатели (0,1 мг/кг) в 20 раз. Это является следствием геологической специфики региона, наличием Восточно-Забайкальской сурьмяной провинции (Павленко, Поляков, 2010).

Таким образом, геохимическая специализация макрофитов, выявленная по концентрированию химических элементов в их составе относительно реперных значений для изученных селитебных территорий Федеральных округов РФ, позволили нам выполнить

районирование изученных регионов и установить минимально-максимальные разбросы 29 элементов в рясковых.

Районирование исследуемой территории по концентрированию ртути рясковыми демонстрируют не только природные, но и техногенные аномалии, коррелирующие с наличием потенциального техногенного источника.

Повышенные содержания экотоксиканта характерны для рясковых г. Ставрополь, д. Просница, с. Нижняя Саниба, г. Уфа и г. Кемерово (Рисунок 11). Большинство субъектов характеризуется сосредоточением крупных производств, в технологических циклах которых используется ртуть (Янин, 2004; Pollman et al, 2019; Tarasova et al, 2018).

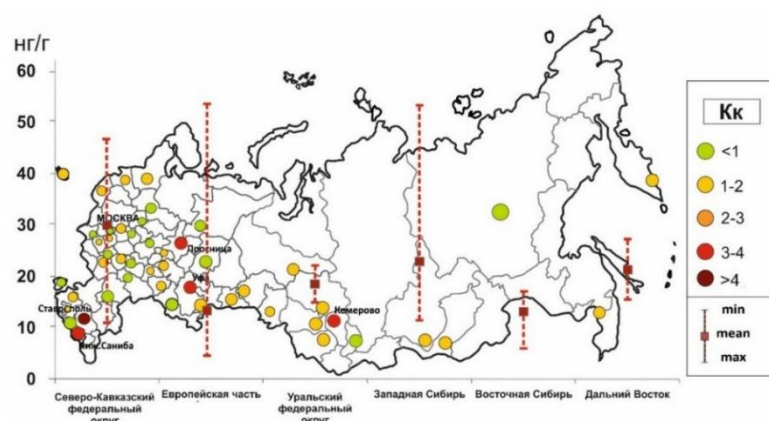


Рисунок 11 - Карта-схема коэффициента концентрации (Кк) ртути в рясковых на территории Российской Федерации относительно среднего геометрического значения элемента по выборке
Индикатором техногенеза является отношение Th/U в рясковых на территории селитебных районов РФ (рисунок 12).

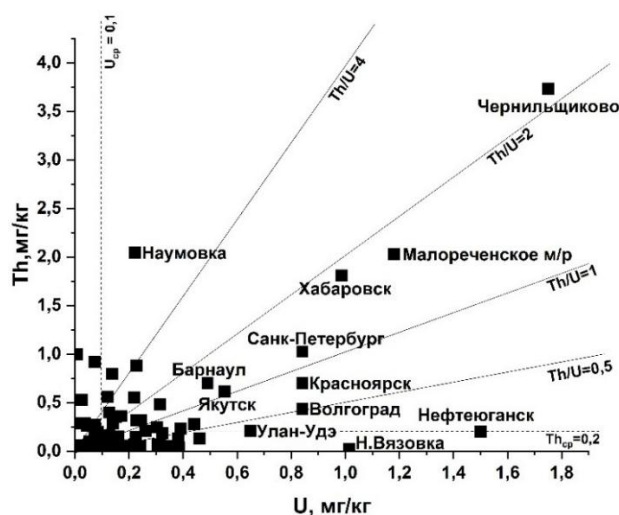


Рисунок 12 - Соотношение Th/U в растениях семейства рясовые (сухое вещество) селитебных территорий России

На территории селитебных районов РФ соотношение Th/U в исследуемых водных растениях варьирует в широких пределах, от 0,02 (с. Нижняя Вязовка) до 21 (г. Курган).

Th/U в рясковых более 2 характерно для территории с отсутствием техногенного прессинга, также рясковых таких районов характеризуются $Th_{\text{сред}}=0,2$ мг/кг и $U_{\text{сред}}=0,1$ мг/кг. В то время как для территорий с наличием техногенных источников Th/U составляет менее 2, а средние концентрации Th и U достигают 1,1 мг/кг и 0,7 мг/кг соответственно.

Исследуемые территории селитебных районов России по характеру концентрирования рясковыми Th, U и соотношения данных элементов в растении можно разделить на две характерные группы: монопрофильные и многопрофильные районы.

Повышенными концентрациями радиоактивных элементов характеризуются рясковые высокоурбанизированных территорий, так, например, ториевой природой характеризуются исследуемые макрофиты городов Юрга ($Th=1$ мг/кг), Томск ($Th=0,9$ мг/кг), Ставрополь ($Th=0,8$ мг/кг), п. Колывань ($Th=0,6$ мг/кг), а урановой – городов Улан-Удэ ($U=0,7$ мг/кг), Волгоград ($U=0,8$ мг/кг), Красноярск ($U=0,8$ мг/кг). Наши данные соотносятся с ранее проведенными работами ряда авторов по другим средам. (Юсупов, 2019).

Таким образом, растения семейства рясковые являются ярким геоиндикатором природно – техногенных обстановок селитебных территорий России.

ПОЛОЖЕНИЕ 3. Рясковые водоемов районов Томской области с высоким развитием нефтедобывающего комплекса характеризуются наличием специфичной ассоциации элементов (Cr, Sb, Br, As, Ta, U); районов активного развития агропромышленного комплекса - калия и фосфора; районов ядерно-топливного цикла - концентрированием урана и лютеция и их локальным распределением, а также изменением отношений $Th/U (<2)$ и $Br/U (<10)$.

Рясковых формируют свой состав исходя из двух главенствующих факторов:

- эоловый привнос, отражающий природно-техногенную составляющую;
- тип вод, влияющий в первую очередь на макроэлементный состав растения.

Данные выводы подтверждается результатами проведенных опытных исследований на территории села Тимирязевское (Томская область), в результате которых рассчитаны коэффициенты концентраций элементов рясковыми в зависимости от периода произрастания (турион / зрелая особь растения) (Таблица 1).

Таблица 1 - Коэффициент концентрации элементов рясковыми в соотношении периода произрастания (турион / зрелая особь растения)

Коэффициент концентрации более 1	Химические элементы
от 1 до 2	Sc, Cr, Cu, Nb, Rh, Te, W, Os, Au, Hg, Tl
от 2 до 5	B, Al, V, Mn, Co, Zn, Ga, Ge, As, Zr, Pd, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Eu, Gd, Tb, Ho, Lu, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Eu, Gd, Tb, Lu, Bi, U

от 5 до 10	Be, Fe, Y, Sm, Dy, Er, Tm, Yb, Re, Sm, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Re, Th
более 10	Sb, In

Стоит обратить внимание, что в приведенных результатах в таблице 2 для макроэлементов коэффициенты концентрации не достигают значений 1 и выше, что говорит о сорбции рясковыми элементами и уносе их в нижние толщи воды уже в фазе турионов. При этом происходит рост концентраций микроэлементов в растении.

Рясковые способны «захоранивать» концентрируемые поллютанты и иметь практическое значение, что может проявляться, при сорбировании нефтепродуктов и благоприятном произрастании в нефтезагрязненных водоемах (Рисунок 13).



Рисунок 13 - Произрастание рясковых в нефтезагрязненных водоемах

Нефтегазодобывающая отрасль имеет существенное развитие на территории Томского региона. Стоит отметить, что в районах с высоким развитием нефтегазодобывающего комплекса (НГДК), к которым можно отнести Александровский, Каргасокский и Парабельский районы, можно выделить схожую эколого-геохимическую ситуацию, которая проявляется в высоком содержании в рясковых Cr, Sb, Br, As, Ta, U, а также всей группы анализируемых РЗЭ.

При оценке данных элементного состава рясковых НГДК методом факторного анализа (Рисунок 14) вышеуказанные элементы выявлены в ассоциациях: группа редкоземельных и радиоактивных элементов совместно с Sb и Cr; ассоциация Sr, Br, Zn; ассоциация As и Au.

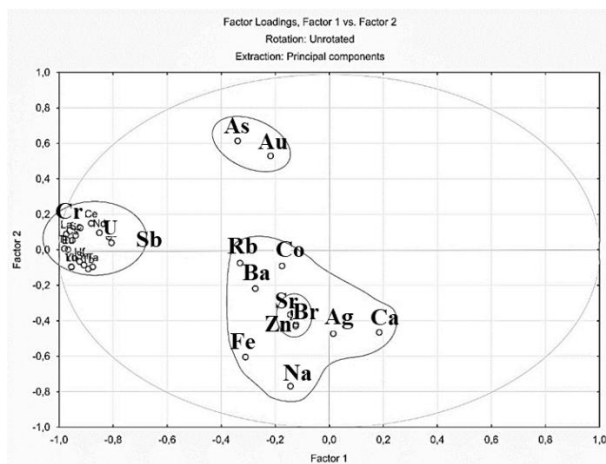


Рисунок 14 - Диаграмма факторного анализа элементного состава рясковых на территории районов нефте-газодобывающего комплекса

Данная группа элементов является специфичной для районов размещения месторождений нефти, где осуществляется деятельность по их добыче и переработке, о чем свидетельствуют многочисленные работы ученых и по другим средам (Готтих и др., 2012; Языков, 2006; Рихванов и др., 2006; Барановская, 2011; Большунова, 2013; Межибор, Большунова, 2014; Шахова и др., 2018, Боев и др., 2019, Беляновская и др., 2019; Таловская, 2021;).

Помимо вышеуказанной группы элементов для рясковых НГДК характерно повышенное концентрирование РЗЭ, что может быть следствием именно размещения нефти (Готтих и др., 2012), но этот вопрос требует дальнейшей проработки (Рисунок 15).



Рисунок 15 - Коэффициенты концентраций элементов рясковыми НГДК относительно средних значений для селитебных районов РФ

Томская область отличается наличием различных месторождений полезных ископаемых, а также неравномерно распределенной техногенной нагрузкой. и ее существенным сосредоточением на территории Томского района. Так, Северный промышленный узел (СПУ) Томского района характеризуется на ограниченной территории расположением более 30 предприятий, в том числе Сибирского химического комбината (Рихванов и др., 2007).

Обнаружение высоких концентраций редкоземельных и радиоактивных элементов в рясковых в южных районах региона могут быть аргументированы не только геологической спецификой территории, но и воздействием техногенного фактора, что подтверждается работами ряда авторов (Рихванов и др., 2006; Иванов, 2016; Наркович и др. 2016; Беляновская и др. 2019).

На рисунке 16 представлены концентрации U и Lu в рясковых на территории Томского района, аномальные содержания которых приходятся на северо-восточную часть района, примыкающую к г.Северск и расположенную по направлению преобладающей розы ветров.

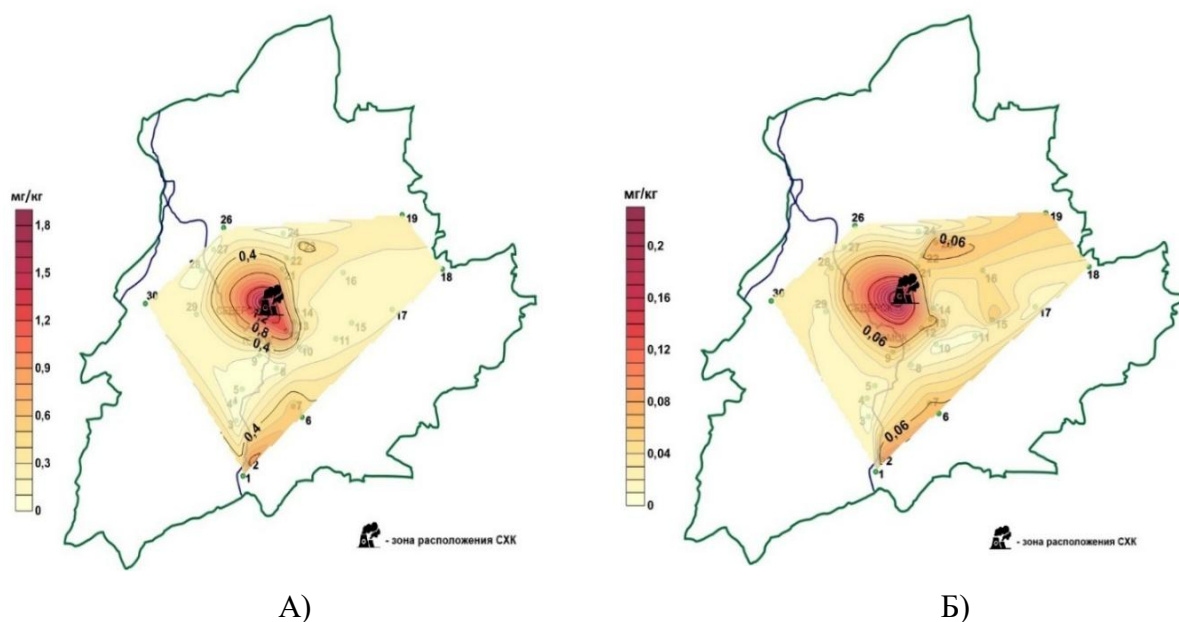


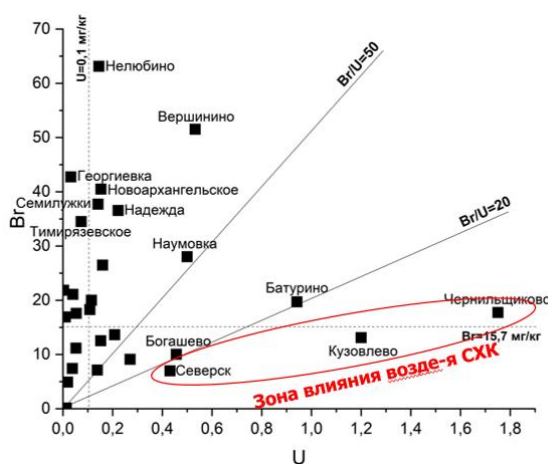
Рисунок 16 - Схематическая карта распределения урана (А) и лютеция (Б) в растениях семейства яснковые (сухое вещество) на территории Томского района

При средних значениях $U=1$ мг/кг и $Lu=2$ мг/кг для Томского района, на территории таких населенных пунктов как Наумовка ($U = 2,5$ мг/кг; $Lu = 4,8$ мг/кг), Надежда ($U = 3,9$ мг/кг; $Lu = 4,8$ мг/кг), Кузовлево ($U = 5,6$ мг/кг; $Lu = 6,1$ мг/кг), Чернильщиково ($U = 21,3$ мг/кг; $Lu = 4,8$ мг/кг) содержание данных элементов в яснковых превышает средние в два и более раз.

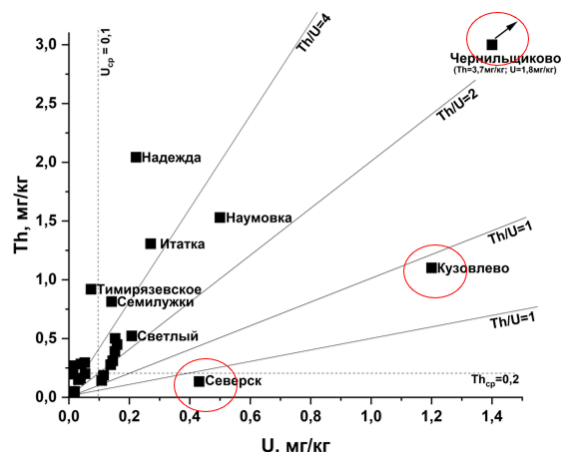
Вышеобозначенные населенные пункты расположены в зоне воздействия СПУ, и, по нашему мнению, испытывают на себе негативное воздействие от ветрового переноса веществ. Ранее данные элементы были зафиксированы в составе волос детей (Барановская, 2015), что подтверждает возможность техногенного источника этих элементов на территории.

Детализация полученных данных по Th/U в яснковых на территории Томского района (Рисунок 17 (А)) показывает резкое возрастание U в зоне влияния потенциального источника его поступления (объекта ядерно – топливного цикла – Сибирского химического комбината) (водоем в д. Чернильщиково) и снижение Th/U на фоне ториевой специфики района (водоемы рядом с с. Итатка и с. Наумовка), которая в первую очередь связана с проявлением циркон-ильменитового месторождения.

Bg/U также хорошо способствует выделению зон влияния СХК проявлением его низких значений (Рисунок 17 (Б)), что хорошо согласуется с ранее проведенными работами по изучению других сред на этой территории, проводимых коллективом авторов под руководством Л.П. Рихванова.



А)



Б)

Рисунок 17 - Br/U (А) и Th/U (Б) в рясовых (сухое вещество) Томской области. Так для рясовых находящихся в населенных пунктах в зоне воздействия СПУ (Северск, Кузовлево, Черныльщицево) характерно Br/U менее 10, в то время как для всей выборки по региону характерно Br/U более 20. Эта же группа населенных пунктов характеризуется Th/U менее 2, что характерно именно для территорий с высоким техногенным прессингом.

Техногенная нагрузка на территории СПУ прослеживается в том числе на примере концентрирования ртути рясовыми. Мы наблюдаем снижение содержаний этого элемента в макрофите по мере удаленности от зоны СХК (Рисунок 18)

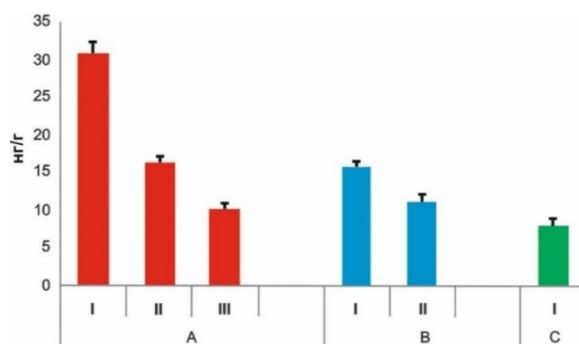


Рисунок 18 - Содержание ртути в рясовых на территории Томского района (сухое вещество, нг/г). Населенные пункты сгруппированы по направлениям: А – северо-восток (I – д. Георгиевка, д. Надежда, с. Наумовка, п. Кузовлево, II – Малиновка, III – п. Светлый, п. Копылово); В – северо-запад (I – с. Моряковский Затон, п. Самусь, II – п. Победа); С – юго-восток (д. Лоскутово)

Так как рясовые предпочитают эвтрофные водоемы, частота их обнаружения в селитебных зонах высокая, особенно в районах развития агропромышленного комплекса.

По результатам выполненного кластерного анализа элементного состава рясовых на территории Томской области выявлена нехарактерная с точки зрения геохимии ассоциация «К-Р», которая является следствием развитого на территории сельского хозяйства (Молчановский, Кривошинский и Шегарский районы) Томской области.

При соотношении частоты встречаемости повышенных содержаний Р и К в рясковых на исследуемых территориях, наблюдается высокий процент для населенных пунктов, где активно применяются азотно-калийно-фосфорные удобрения.

Таким образом, для территории Томской области выполнено районирование по характеру концентрирования и распределения отдельных химических элементов и их групп с выявлением территорий, характеризующихся специфичными природно – техногенными обстановками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Растения семейства рясковые являются уникальным объектом для геоэкологического мониторинга ввиду их простой морфологии и широкого ареала произрастания, включающего, в том числе, территории селитебных зон России.

Современных работ, изучающих элементный состав рясковых как индикатора состояния окружающей среды, мало и, в основном, они представлены в комплексных геоэкологических исследованиях, которые основываются на сопоставлении сорбционных способностей различных компонентов окружающей среды.

Впервые рассчитано среднее содержание 28 химических элементов в водных растениях семейства рясковые (*Lemnaceae*), произрастающих на селитебных территориях России.

Выявлено, что широким спектром элементов, концентрации которых выше средних величин во всей выборке рясковых, характеризуются населенные пункты, отличающиеся высокой степенью урбанизации и техногенным прессингом (гг. Санкт-Петербург, Ставрополь, Хабаровск, Красноярск и Томск), в то время как природная геохимическая специализация территории отражается в водных растениях повышенными содержаниями элементов, поступающих преимущественно с акцессорными минералами (с. Газимурский Завод).

Получена информация о среднем содержании ртути в пресноводных растениях семейства рясковых (*Lemnaceae*) на территории России (среднее геометрическое – 14,7 нг/г, среднее арифметическое – 18 нг/г).

Аномальные концентрации ртути в рясковых обнаружены для территорий, которые характеризуются наличием его потенциального техногенного источника (заводы по производству каустической соды и хлора ртутным методом, углехимическая промышленность, а также зоны, отличающиеся высокой частотой встречаемости крупных техногенных объектов на локальной территории).

Степень воздействия промышленных объектов на концентрирование ртути рясковыми ярко продемонстрированы на территории Томской области, Томского района. Участки с высоким содержанием поллютанта в рясковых сконцентрированы в зоне, характеризующейся наибольшим

техногенных прессингом, также наблюдается увеличение концентраций ртути по мере приближения к источнику загрязнения.

Впервые было рассчитано среднее содержание 28 химических элементов в водных растениях семейства рясковые (*Lemnaceae*), произрастающих на территории Томской области.

Согласно полученных данных эко-геохимическая обстановка Томской области по данным элементного состава рясковых сформированы в следствии влияния природно-техногенных факторов, которые в первую очередь представлены горнодобывающей отраслью.

Детально изучен элементный состав рясковых, произраставших в водоемах двух типов вод: натриевый (Новосибирская обл.) и кальциевый (Томская область).

Выполнен анализ специфики концентрирования элементов рясковыми в системе «вода-рясковые-донные отложения».

Полученные результаты по КБП и Кк могут говорить о влиянии на сорбционную способность рясковых не столько типа вод, сколько экогеохимической обстановки территории произрастания для некоторого спектра элементов.

Наблюдается различный характер концентрирования элементов редкоземельной и радиоактивной группы рясковыми водоемов с натриевым и кальциевым типами вод.

Поступление в рясковые РЗЭ преимущественно не с водой, а с эоловым привносом подтверждаются результатами СЭМ.

Основным фактором формирования элементного состава рясковых является лито-геохимическая специфика территорий, и зависит от эолового привноса, наличия зоны сноса и т.д. Влияние эолового привноса на характер концентрирования элементов рясковыми в первую очередь проявляется в индикаторных соотношениях радиоактивных и редкоземельных элементов.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в рецензируемом журнале из списка ВАК

1. **Барановская А. Ю.**, Барановская Н. В., Судыко А. Ф. Элементный состав растений семейства рясковые (*Lemnaceae*) как индикатор природно-техногенных обстановок территории Томской области // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 1. С. 8–17.

2. Барановская Н. В., **Барановская А. Ю.**, Судыко А. Ф. Элементный состав растений семейства рясковые (*Lemnaceae*) на урбанизированных территориях Российской Федерации // Геохимия. – 2023. – Т. 68. – №. 6. – С. 638-648.

Публикации в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus или Web of Science

3. Барановская Н. В., **Барановская А. Ю.**, Капитонова О. А. Ртуть в ряске как индикатор техногенеза на территории России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – №. 10. – С. 23-31.

4. **Барановская А. Ю.**, Петровский А. Б., Барановская Н. В. Экогеохимия ртути в гидробионтах и среде их обитания на территории Москвы // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – №. 9. – С. 60-66.

Публикации, индексируемые в иных журналах

1. **A. Baranovskaya**, N. Baranovskaya. Duckweed as an indicator for ecological and geochemical state of the environment //Conference Proceedings, International Meeting of Geohealth Scientists – GNC2020, ProScience. – 2020. – Vol. 3. – pp. 13-19.

Публикации, входящие в РИНЦ, по результатам участия в различных конференциях

1. **Барановская А. Ю.** Элементный состав растений семейства рясковые (Lemnaceae) как индикатор эколого-геохимических обстановок урбанизированных территорий Российской Федерации // XIII Международная биогеохимическая школа-конференция «Эволюция биосферы, биогеохимические циклы и биогеохимические технологии: связь фундаментальных и прикладных исследований», посвященной 160-летию со дня рождения В.И. Вернадского / Товарищество научных изданий КМК. – Пущино: 2023. – С. 310-312 с.

2. **Барановская А. Ю.** Индикаторные показатели накопления химических элементов в составе растений семейства рясковые (Lemnaceae) //Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVI Международного симпозиума имени академика МА Усова студентов и молодых учёных, посвященный 90-летию со дня рождения НМ Рассказова, 120-летию со дня рождения ЛЛ Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика МА Усова, Томск, 4-8 апреля 2022 г. Т. 1. – Томский политехнический университет, 2022. – Т. 1. – С. 256-259.

3. **Барановская А. Ю.**, Барановская Н. В. Элементный состав растений семейства рясковые (Lemnaceae) как индикатор эколого-геохимического состояния территорий XXIXIII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» , 2023. – Т. 1. – С. 25-26.

4. **Барановская А. Ю.**, Барановская Н. В. Индикаторные свойства элементного состава водных растений семейства рясковые (Lemnaceae) на территории Российской Федерации // Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине. – 2021. – С. 334.