

УДК 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4305

## Использование статистических показателей в оценке эколого-геохимической ситуации территории восточной части Колпашевско-Туруханской минерагенической зоны

Е.В. Перегудина<sup>1✉</sup>, И.С. Соболев<sup>2</sup>, Н.В. Барановская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>2</sup> ООО «Гео Сервис», Россия, г. Томск

✉ peregudina@tpu.ru

### Аннотация

**Актуальность** исследования вызвана необходимостью статистической идентификации природных и антропогенных биогеохимических аномалий при проведении эколого-геохимических исследований на территориях локализации глубокозалегающих рудных месторождений в условиях слабой антропогенной нагрузки. Сложность их разделения по источникам возникновения связана со схожей лито-сидерофильной геохимической специализацией осадочных отложений железорудной, титан-циркониевой формаций и современных почв ландшафтов таежной зоны. К тому же в исследованиях реализована методика пробоподготовки биоматериала, направленная на получение возможности его использования как природного планшета для изучения эолового и пылеаэрозольного поступления вещества. Как следствие, есть насущная необходимость введения процедур при статистической обработке биогеохимических данных, позволяющих качественно дифференцировать эффекты концентрирования химических элементов в связи с корневым питанием и пылевой аккумуляцией на листьях растительности. **Цель:** статистическая оценка изменчивости содержания и взаимосвязей проанализированных химических элементов в листьях осины в зоне антропогенного влияния транспортных коридоров, пересекающих участки локализации погребенных залежей железных руд Бакчарско-Колпашевского рудного района Колпашевско-Туруханской минерагенической зоны; качественная биогеохимическая индикация корневого и пылевого обогащения биоматериала на участках аномального концентрирования химических элементов с использованием информации по уровням накопления редкоземельных элементов. **Объекты:** почва, листья осины обыкновенной (*Populus tremula* L., 1753). **Методы.** Региональное биогеохимическое и литохимическое опробование осуществлялось по трем профилям вдоль дорог местного значения с асфальтовым и грунтовым покрытием на въездах в населенные пункты. Единые для методов точки сбора материала смещались от транспортных коридоров в сторону на расстояние не менее 20 м в условия не нарушенных ландшафтов. После пробоподготовки в материале определялись концентрации 28 химических элементов методом инструментального нейтронно-активационного анализа. Интерпретация геохимических данных опиралась на результаты многокомпонентного статистического анализа. **Результаты.** Изученные территории по линиям региональных исследований характеризуются фоновыми параметрами биогеохимического и литохимического поля. Выявленная биогеохимическая аномалия обусловлена пылевым ореолом, сопровождающим дорогу с грунтовым покрытием. Уровни накопления редкоземельных элементов хорошо реагируют на привнос тонкодисперсного пылеаэрозольного и эолового материала.

**Ключевые слова:** Почва, растительность, листья, осина, пылевое загрязнение, редкоземельные элементы, статистические методы, эколого-геохимическая оценка территории.

**Благодарности:** Обработка данных выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 20-64-47021) <https://rscf.ru/en/project/20-64-47021/>

**Для цитирования:** Перегудина Е.В., Соболев И.С., Барановская Н.В. Использование статистических показателей в оценке эколого-геохимической ситуации территории восточной части Колпашевско-Туруханской минерагенической зоны // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 34–49. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4305

UDC 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4305

## Statistical parameters in assessing ecological and geochemical state of the Kolpashevo-Turukhan mineragenic zone eastern part

E.V. Peregudina<sup>1</sup>✉, I.S. Sobolev<sup>2</sup>, N.V. Baranovskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC «Geo Service», Tomsk, Russian Federation

✉ peregudina@tpu.ru

### Abstract

**The relevance.** The required statistical identification of natural and anthropogenic biogeochemical anomalies when conducting ecological and geochemical studies on the territories of buried exogenous ores with a weak anthropogenic pressure. The difficulty of their identification according to their sources is related to a similar litho-siderophilic geochemical specialization of sedimentary rocks of iron ore, titanium-zirconium formations and modern soils of taiga zone landscapes. Moreover, the research implemented a method for biomaterial sample preparation. This method is aimed at obtaining the possibility of using a biomaterial sample as a natural indicator to reveal the aeolian and dust aerosol substance intake. As a result, there is an urgent need to involve steps in biogeochemical data statistical processing that allows one to differentiate qualitatively the effects of chemical elements concentration via root nutrition and dust accumulation on the leaves. **The aim.** Statistical assessment of content variability and relationships of chemical elements in aspen leaves in the zone of anthropogenic influence of transport roads crossing the localization areas of buried iron ore deposits of the Bakcharsko-Kolpashevo ore district, Kolpashevo-Turukhan mineragenic zone. Qualitative biogeochemical identification of biomaterial enrichment through root and dust in areas of anomalous concentration of chemical elements using data on accumulation of rare earth elements. **Objects.** Soil, leaves of common aspen (*Populus tremula* L., 1753). **Methods.** Regional biogeochemical and lithochemical sampling was carried out in three profiles along local roads with asphalt and unpaved surfaces at the entrances to settlements. The sampling points common for the methods were shifted off the roads at a distance of at least 20 m to undisturbed landscapes. After sample preparation, the concentration of 28 chemical elements in the samples was determined by instrumental neutron activation analysis. The interpretation of geochemical data was based on the results of multicomponent statistical analysis. **Results.** The studied territories along the lines of regional research are characterized by the background biogeochemical and lithochemical values. The revealed biogeochemical anomaly is caused by a dust halo that accompanies the unpaved road. The rare earth elements levels show the influence of fine dust-aerosol and aeolian material intake.

**Keywords:** Soil, vegetation, leaves, aspen, dust pollution, rare earth elements, statistical methods, ecological and geochemical assessment.

**Acknowledgements:** Data processing was carried out as part of a grant from the Russian Science Foundation (project no. 20-64-47021) <https://rscf.ru/en/project/20-64-47021/>

**For citation:** Peregudina E.V., Sobolev I.S., Baranovskaya N.V. Statistical parameters in assessing ecological and geochemical state of the Kolpashevo-Turukhan mineragenic zone eastern part. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 34–49. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4305

### Введение

Постоянно ведется поиск индикаторов оценки состояния окружающей среды. Биологические объекты зачастую используются в качестве биогеоиндикаторов, потому что они позволяют выявить специфические особенности среды, отражают эколого-геохимическое состояние территории исследования и конкретно состояние самой биоты, что является важным для человека. Реакция биологического материала на концентрацию того или иного химического элемента очень важна с точки зрения профилактики заболеваний населения.

Изучение вклада биогенных факторов в миграцию элементов и ответ эколого-геохимической системы на природно-техногенную ситуацию входит в задачи биогеохимического анализа [1–5]. Растительность активно участвует во взаимодействии компонентов ландшафта: почвенный покров – поверхностные и грунтовые воды – кора выветривания, в совокупности формируя его геохимический облик. Специфические особенности, такие как тип растительного сообщества, его геохимическая специализация, видовой состав, биомасса, прирост, опад и т. д., характеризуют биологический круго-

ворот. Во многих работах использовались разные приемы районирования территорий, которые необходимо рассматривать с природно-техногенной точки зрения [6–8].

Растительные объекты в своем элементном составе отражают химическую композицию как почвенных растворов, так и пылеаэрозольной составляющей, оседающей на поверхности листовых пластинок и через устья проникающих в ткани листьев [9]. Этим и была продиктована методика пробоподготовки растительного материала, исключаящая смыв пылевой составляющей с поверхности листьев.

Территория региональных исследований характеризуется невысокой плотностью населения с яркой тенденцией его миграции из небольших деревень в районные центры. В настоящее время хозяйственная активность, по сути, сведена к лесозаготовке в сравнительно небольших масштабах и фермерской деятельности по животноводству, выращиванию кормовых, реже овощных культур. Как следствие, доминирующий вид местного антропогенного воздействия обусловлен эоловым и «транспортным» пылевым поступлением тонкодисперсного терригенного материала с сельскохозяйственных полей и автомобильных дорог. Наряду с доступностью для работы этот момент и определил выбор точек опробования вдоль транспортных коридоров с разным типом покрытия (грунтовым и асфальтовым). Влияние дорожной пыли как важный фактор антропогенного загрязнения и негативного воздействия на растительность отмечается в некоторых литературных источниках [10–12]. При этом некоторыми исследователями предлагается выделять автомобильные дороги отдельными специфическими объектами антропогенного воздействия [13].

Эколого-геохимическое картирование на землях с низкой антропогенной нагрузкой интересно тем, что позволяет получить и проанализировать информацию по фоновой флуктуации геохимического поля. Определить региональные и местные локальные достаточно легко идентифицируемые природные и антропогенные факторы, влияющие на изменчивость используемых параметров распределения химических элементов. Результаты обсуждаемых в статье биогеохимических региональных исследований во многом носят такой характер. Примечательной чертой изученной территории является наличие железорудных залежей Бакчарского месторождения. Свойство концентрировать определенный спектр химических элементов растениями активно используется при геохимических поисках погребённых месторождений полезных ископаемых [14–16]. Кроме того, биогеохимическая специализация крупных территорий учитывается и в эколого-геохимических исследованиях [17]. Редкоземельные элементы привлекаются как один из вы-

соко информативных инструментов анализа эколого-геохимической информации природных планшето- [18–21]. Интерпретация полученных региональных данных выполнена в контексте их индикаторной роли пылеаэрозольного загрязнения с применением статистических методов, которые активно применяются для оценки эколого-геохимической обстановки и индикации природы аномалий на территориях [20–23].

### **Геологическая и геохимическая обстановка территории**

Профили биогеохимического и литохимического опробования пройдены в юго-восточной части Западно-Сибирской эпигерцинской платформы и пересекают несколько крупных структурно-тектонических элементов. Большинство точек опробования расположены в пределах Колпашевско-Туруханской минерагенической зоны, являющейся элементом Кулундино-Кетской тектонической (структурно-формационной) субпровинции [24, 25] (рис. 1). По данным глубокого бурения и геофизической информации, фундамент, залегающий на глубине 1,5–2,0 км, сложен породами глинисто-сланцевой и аспидной геосинклинальных формаций, дислоцирован разломами различного ранга и пронизан многочисленными гранитоидными интрузиями. Породы консолидированного основания перекрыты мезозойско-кайнозойским платформенным чехлом [24].

Минеральные ресурсы представлены общераспространенными месторождениями полезных ископаемых, месторождениями и проявлениями осадочных железных руд, циркон-ильменитовых россыпей, бурого угля, фосфоритов. Все они сформированы в литолого-стратиграфических границах верхнемеловых и палеоген-четвертичных отложений и относятся к экзогенному типу [24]. Наибольшее промышленное значение имеет Бакчарское месторождение осадочных железных руд, являющееся частью Западно-Сибирского железорудного бассейна [26, 27]. В пределах бакчарского рудного узла были проведены опытно-методические работы по скважинной гидродобыче (СГД) рыхлой руды из бакчарского горизонта и сформированы рудоотвалы (карты намыва) от 1 до 2 тыс. т. Присутствие титан-циркониевой, бурого угольной и железорудной формаций определяет металлогеническую и геохимическую специализацию территории исследований [28, 29]. Последняя характеризуется как лито-сидерофильная.

В границах площади исследований рельеф представляет собой слабо всхолмленную склоновую поверхность, полого погружающуюся в северо-западном направлении от сел Пихтовка–Кожевниково, где фундамент почти выходит на

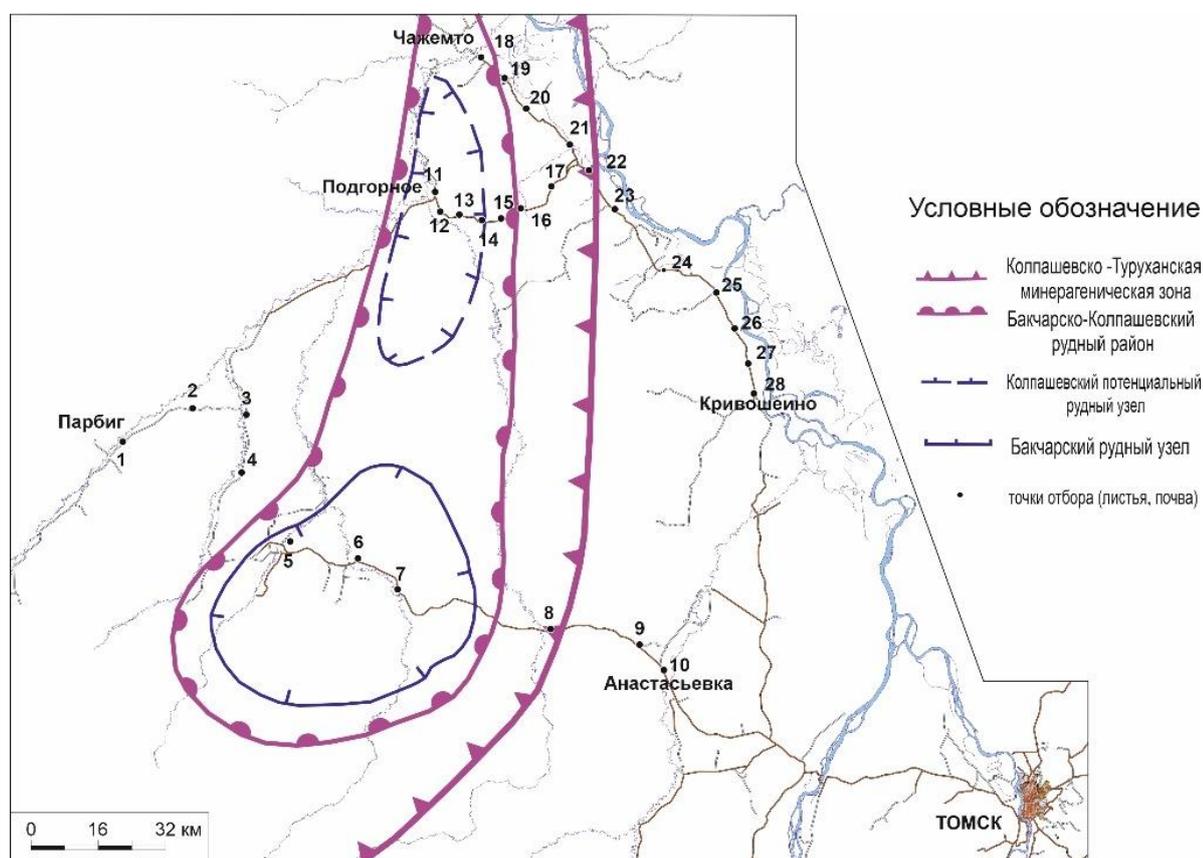
дневную поверхность, до с. Парбиг, где глубина его залегания достигает 2,5–2,7 км (угол наклона, таким образом, составляет около 1 %). Относительно спокойный по рельефу участок этого склона образует крупный структурный элемент – Барабинско-Пихтовскую моноклиаль, занимающую всю юго-восточную половину описываемого района.

Почвенный покров разнообразен: типичны автоморфные, полугидроморфные и гидроморфные почвы, сформированные в условиях повышенного гидроморфизма, обусловленного высокой заболоченностью. На территории исследования доминируют три типа почв [30]: подзолистые, дерново-глеевые, болотные. По линиям опробования преобладают подзолистые почвы.

В геохимическую характеристику осадочного чехла этой части Западно-Сибирской молодой

платформы значимый вклад вносит Бакчарское месторождение осадочных железных руд. Во многих работах отмечена специфика минералогеохимического материала, который показывает, что осадочные оолитовые железные руды разных горизонтов Бакчарского рудного узла в той или иной степени обогащены Pt, Pd, Ir, Au, Ag, редкими, рассеянными и радиоактивными элементами Sc, Be, Ge, Y, Mo, V, U, Th и др. (А.К. Мазуров, Г.Ю. Боярко, 2005; Е.М. Асочакова, 2010; О.М. Гринев, 2007, 2010; В.А. Карепина, В.А. Домаренко, Л.П. Рихванов, 2012; М.А. Рудмин, 2014; И.Р. Шайхиев, 2017).

Также для торфяных залежей на данной территории отмечается повышенное содержание аутигенных минеральных включений гидроокислов железа и фосфатов [31].



**Рис. 1.** Схема опробования района исследования. Границы минерагенической зоны и рудных узлов приняты по [25].  
 Примечание: (1–28) пункты опробования поблизости от населенных пунктов: Парбиг-2 (1), Парбиг-1 (2), Высокий Яр (3), Пчелка (4), Бакчар (5), Поротниково (6), Польшанка (7), Плотниково (8), Вороновка (9), Анастасьевка (10), Подгорное-1 (11), Подгорное-2 (12), Ермиловка (13), Сухой Лог (14), Чемондаевка-1 (15), Чемондаевка-2 (16), Коломинские Гривы (17), Чажемто (18), Старокороткино (19), Староабрамкино (20), Леботер (21), Новоколомино (22), Обское (23), Верхняя Федоровка (24), Молчаново (25), Соколовка (26), Жуково (27), Кривошеино (28)

**Fig. 1.** Scheme of sampling the study area. Note: (1–28) sampling sites near settlements: Parbig-2 (1), Parbig-1 (2), Vysokii Yar (3), Pchelka (4), Bakchar (5), Porotnikov (6), Polynyan (7), Plotnikov (8), Voronovka (9), Anastasyevka (10), Podgornoe-1 (11), Podgornoe-2 (12), Ermilovka (13), Sukhoi Log (14), Chemondaevka-1 (15), Chemondaevka-2 (16), Kolomin-skie Grivy (17), Chazhemto (18), Starokorotkino (19), Staroabramkino (20), Leboter (21), Novokolomino (22), Obskoe (23), Verkhnyaya Fedorovka (24), Molchanovo (25), Sokolovka (26), Zhukovo (27), Krivosheino (28)

### Объект и методика исследования

Биогеохимическое и литохимическое опробование осуществлялось по трем региональным профилям вдоль дорог местного значения с асфальтовым и грунтовым покрытием поблизости от населенных пунктов (рис. 1). Единые для методов точки сбора материала смещались от транспортных коридоров в сторону на расстояние не менее 20 м. Отбор проб в зоне влияния дорог, в т. ч. грунтовых, осуществлялся сознательно в контексте исследований геохимической специфики пылевых ореолов и, в частности, ее схожести по компонентному составу с местным природным эоловым материалом. Данное обстоятельство учитывается недостаточно при интерпретации эколого-геохимических данных, особенно при идентификации с помощью особенностей распределения REE воздействия предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ).

Почвы отбирались методом конверта из горизонта А на глубину 10–15 см [32, 33]. Вес пробы не превышал 150–200 г. В качестве растительного материала использовали листья осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), широко применяемые в биогеохимических исследованиях [34–36]. Отбор проб листьев проводился в конце августа методом средней пробы из нижней внешней части кроны по окружности на высоте 1,5–2 м от поверхности земли с приблизительно одновозрастных деревьев одного вида, без черешков, масса объединенной пробы составляла 100 г сырого вещества. Методика пробоотбора и пробоподготовка проведена в соответствии с рекомендациями [37].

Подготовка образцов почв к анализу заключалась в их просушивании, просеивании через сито с ячейкой 1 мм, истирании, взвешивании, квартовании. Пробы листьев сушили до воздушно-сухого состояния без предварительной влажной отчистки для сохранения пылевой составляющей. Данная особенность пробоподготовки направлена на использование листьев в качестве природного планшета, аккумулирующего природный эоловый и антропогенный пылеаэрозольный материал [17].

Подготовка листьев для элементного анализа заключалась в их сухом озолении в муфельной печи при 450 °С в течение 5 часов согласно [33]. Навески почв и золы листьев весом  $100 \pm 1$  мг паковались в алюминиевую фольгу и передавались в лабораторию. Определение концентраций 28 химических элементов проводили инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИНАА) по аттестованной методике (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ) в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (ТПУ) (аналитики А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская).

### Обработка и интерпретация данных

В статистических расчетах участвовала информация по элементному составу 56 образцов растительного и почвенного материала. При обработке данных осуществлен переход к относительным величинам концентрирования – коэффициентам концентрации (КК), путем деления содержаний химических элементов на соответствующие средние медианные оценки. Значимая прямая корреляция между редкоземельными элементами (rare earth elements – REE) позволила представить их в виде суммы как всего проанализированного спектра, так и с разделением на REE цериевой (La, Ce, Nd, Sm, Eu) и иттриевой (Tb, Yb, Lu) групп [38, 39]. Чтобы вернуть полученные числовые значения аддитивных показателей к средним уровням КК химических элементов, они нормированы по количеству участвующих в суммах элементов. Этот принцип выдержан для всех привлеченных в анализе суммарных модулей.

Геохимическое поле содержания химических элементов в листьях в сравнении с почвами более дифференцировано для представительной группы компонентов (табл. 1). Однако его пространственная неоднородность, оцениваемая показателем вариации геохимического спектра (ВГС) [40], демонстрирует фоновые значения для листьев и почв на большей части линий исследований (рис. 2).

Исключением является отрезок с. Парбиг – с. Пчелка, где ВГС элементов в растительном материале резко отличаются в сторону больших значений.

**Таблица 1.** Дифференциация геохимического поля по неоднородности [40, 41]

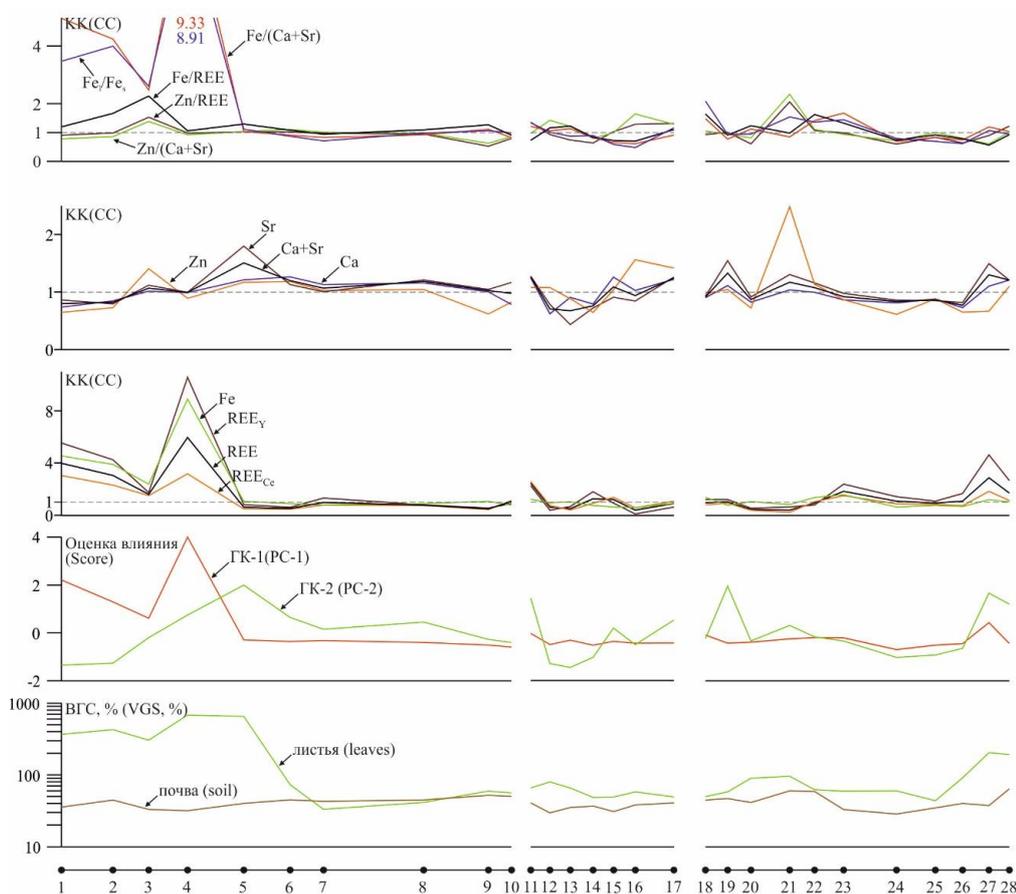
**Table 1.** Gradation of geochemical pattern inhomogeneity [40, 41]

Материал проб Samples material	Характер геохимических полей по значениям коэффициента вариации, V, % Geochemical pattern character according to the variation coefficient values, V, %			
	однородные homogeneous (V<39)	неоднородные inhomogeneous (V=40–79)	весьма неоднородные highly inhomogeneous (V=80–159)	крайне неоднородные extremely inhomogeneous (V>160)
Листья Leaves	Ca, Sr, Zn	Ba, Br, Ce, Co, La, Na, Nd, Rb, Sb	Ag, As, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, Lu, Nd, Sc, Sm, Tb, Th, U, Yb	Ta
Почва Soil	As, Ca, Ce, Co, Cs, Ba, Eu, Fe, Hf, La, Lu, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Sm, Tb, Th, U, Yb	Br, Cr, Ta, Zn	–	–

Во многом пробы этого участка сказались на общей оценке степени рассеяния литофильных элементов в листьях осины (табл. 1). По условиям опробования обсуждаемый интервал профиля отличается от других участков наличием грунтового покрытия дороги.

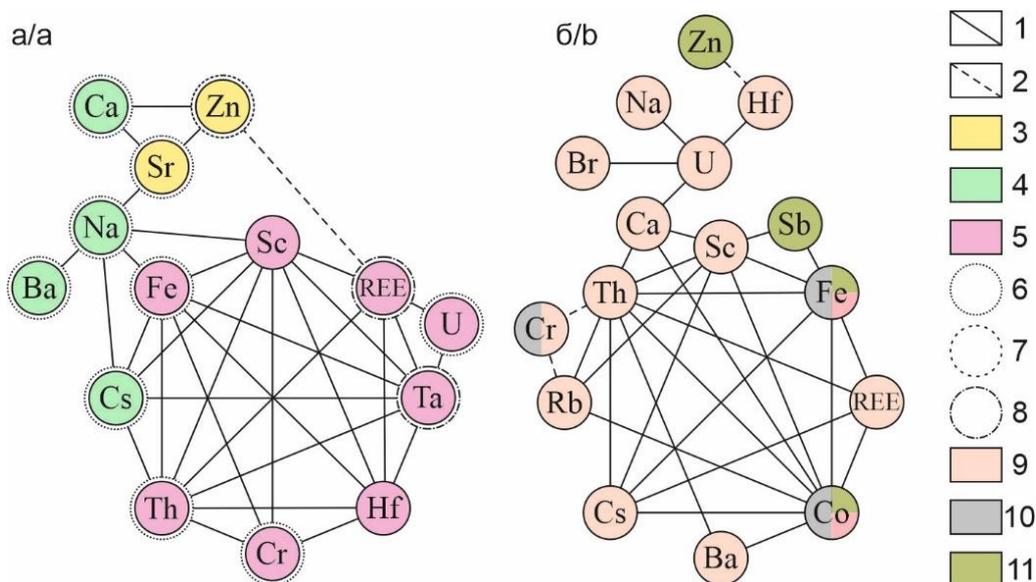
Структура корреляционных связей химических элементов в листьях и почвах в значительной мере определяется схожей по набору компонентов наиболее представительной ассоциацией (рис. 3). Для почв она не противоречит известной литосидерофильной геохимической специализации осадочных отложений верхней части разреза Кулундино-Кетской тектонической субпровинции [29]. В растительном материале происходит некоторое обособление элементов, характеризующихся ин-

тенсивным и средним биологическим накоплением. Однако не наблюдается закономерного обособления какой-либо ассоциаций по признаку биогеохимической поисковой информативности. Он во многом определяется способностью к аккумуляции химических элементов в тканях растений в зависимости от их содержания в корнеобитаемой зоне – так называемой «барьерностью» [15, 42–44]. Это обстоятельство указывает на отсутствие признаков дисперсионных ореолов минеральных скоплений, оказывающих заметное влияние на элементный состав биоматериала. Следует отметить, что в целом однозначной контрастной связи изменчивости биогеохимического и литохимического поля с элементами регионального геологического и ландшафтного строения территорий не выявлено.



**Рис. 2.** Графики изменчивости биогеохимических и литохимических параметров. Примечание: (1–28) пункты опробования поблизости от населенных пунктов: Парбиг-2 (1), Парбиг-1 (2), Высокий Яр (3), Пчелка (4), Бакчар (5), Поротниково (6), Полынянка (7), Плотниково (8), Вороновка (9), Анастасьевка (10), Подгорное-1 (11), Подгорное-2 (12), Ермиловка (13), Сухой Лог (14), Чемондаевка-1 (15), Чемондаевка-2 (16), Коломинские Гривы (17), Чажземто (18), Старокороткино (19), Староабрамкино (20), Леботер (21), Новоколомино (22), Обское (23), Верхняя Федоровка (24), Молчаново (25), Соколовка (26), Жуково (27), Кривошеино (28)

**Fig. 2.** Graphs of variability of biogeochemical and lithochemical parameters. Note: (1–28) are the sampling sites near the settlements: Parbig-2 (1), Parbig-1 (2), Vysokii Yar (3), Pchelka (4), Bakchar (5), Porotnikovo (6), Polynyanka (7), Plotnikovo (8), Voronovka (9), Anastasyevka (10), Podgornoe-1 (11), Podgornoe-2 (12), Ermilovka (13), Sukhoi Log (14), Chemondaevka-1 (15), Chemondaevka-2 (16), Kolominskii Grivy (17), Chazhemto (18), Starokorotkino (19), Staroabramkino (20), Leboter (21), Novokolomino (22), Obskoe (23), Verkhnyaya Fedorovka (24), Molchanovo (25), Sokolovka (26), Zhukovo (27), Krivosheino (28)



**Рис. 3.** Графы корреляционных ассоциаций элементов ( $R_{crit}=0,48$ ,  $p=0,01$ ) в листьях (а) и почвах (б): (1, 2) характер корреляционной связи: прямой (1), обратный (2); градация по интенсивности биологического накоплений [6]: интенсивного и среднего накопления (3), среднего накопления и сильного захвата (4), среднего, слабого и очень слабого захвата (5); (6–8) биогеохимическая поисковая информативность элементов, в т. ч. в коре осины дрожащей [15, 44, 45]: относительно неблагоприятные (6), относительно благоприятные (7), наиболее благоприятные (8); (9–11) геохимическая классификация элементов [46]: литофильные (9), сидерофильные (10), халькофильные (11)

**Fig. 3.** Graphs of correlation associations of elements ( $R_{crit}=0.48$ ,  $p=0.01$ ) in leaves (a) and soils (b): (1, 2) nature of correlation: direct (1), reverse (2); gradation according to the intensity of biological accumulations [6]: intensive and medium accumulation (3), medium accumulation and strong capture (4), medium, weak and very weak capture (5); (6–8) biogeochemical search informativity of elements, including in the bark of trembling aspen [15, 44, 45]: relatively unfavorable (6), relatively favorable (7), most favorable (8); (9–11) geochemical classification of elements [46]: lithophile (9), siderophile (10), chalcophile (11)

Тем не менее результаты многофакторного анализа методом главных компонент (ГК) показали существование значимых не коррелирующих факторов, включающих в материале осины ассоциации группы химических элементов преимущественно слабого (ГК-1), интенсивного и среднего (ГК-2) биологического накопления (табл. 2). Обособление ГК-3 может объясняться химическим поведением элементов, являющихся аналогами биологически значимых Ca и K. Сопоставление пространственной изменчивости факторного влияния ГК-1 и ГК-2 показало, что максимальная разобщенность амплитуды и сигнатуры графиков происходит на интервале высоких значений ВГС, где вклад распределения ассоциации элементов-гидролизатов и легирующих их компонентов в общую дисперсию геохимического поля резко доминирует (рис. 2).

Спектр элементов, значимо коррелирующих с ГК-1, однозначно указывает, что его влияние связано с терригенным материалом частиц почв, в т. ч. эоловой и дорожной пыли. Для косвенной оценки интенсивности ее аккумуляции на природных планшетах возможно использование числовой информации по уровням накопления суммы REE [47]. Выбор из ассоциации литофилов и сидерофилов в

пользу REE обусловлен высокой статистической устойчивостью суммы, которая в конкретном случае обеспечена данными о концентрации восьми компонентов. Активность поглощения элементов корневой системой растений в т. ч. зависит от щелочно-кислотных параметров почв [15]. Собственно, водородный показатель на точках опробования не измерялся. Тем не менее сделано логическое допущение, что сумма Ca и Sr является опосредованным маркером интенсивности биологического накопления элементов за счет химической композиции почв. Для индикации преобладающего источника (почва – эоловая пыль) поступления компонентов в листья осины также были привлечены Fe и Zn. С одной стороны, гидроокислы и окислы железа являются хорошими сорбентами для группы химических элементов-комплексобразователей и гидролизатов, широко представленных в ГК-1 (табл. 2). Таким образом, они являются важной составляющей формирования химического состава пыли. С другой стороны,  $Fe^{2+}$  активно участвует в водной миграции и, например, при трансформации физико-химической обстановки в почвах под воздействием поступающих с глубоких горизонтов углеводов активнее поглощается растениями.

**Таблица 2.** Матрица факторных нагрузок КК химических элементов в листьях осины (вращение Varimax, собственное значение фактора  $\geq 1$ )

**Table 2.** Factor loads matrix of chemical elements CC in aspen leaves (Varimax rotation, factor eigenvalue  $\geq 1$ )

Элементы Elements	Факторные нагрузки (выделены нагрузки $\geq 0,7$ ) Factor loadings (marked loadings are $\geq 0,7$ )		
	ГК-1/PC-1	ГК-2/PC-2	ГК-3/PC-3
Ag	0,555	0,250	0,333
As	<b>0,777</b>	0,025	0,148
Ba	-0,070	0,097	<b>-0,802</b>
Br	0,124	0,136	0,158
Ca	-0,109	<b>0,782</b>	0,126
Co	-0,068	0,050	0,207
Cr	<b>0,951</b>	-0,170	0,082
Cs	<b>0,928</b>	0,021	-0,164
Fe	<b>0,981</b>	-0,038	0,032
Hf	<b>0,978</b>	-0,112	0,031
Na	<b>0,712</b>	0,465	-0,360
REE	<b>0,891</b>	0,057	0,024
Rb	-0,019	-0,088	<b>-0,895</b>
Sb	0,016	0,298	0,018
Sc	<b>0,982</b>	-0,086	0,030
Sr	-0,069	<b>0,886</b>	-0,040
Ta	<b>0,925</b>	0,073	0,087
Th	<b>0,977</b>	-0,032	-0,026
U	<b>0,785</b>	0,061	-0,069
Zn	-0,135	<b>0,701</b>	0,064
%, от общей дисперсии %, total variance	48,8	10,1	9,1

Примечание: ГК – главный компонент.

Note: PC – principal component.

«Противофазные» биогеохимические и литохимические аномалии Fe используют как индикаторы залежей нефти и газа [41, 48]. В нашем случае данный «противофазный» показатель этого элемента интересен с точки зрения возможности формирования биогеохимических аномалий над железорудными горизонтами Бакчарского месторождения. Цинк, являясь безбарьерным элементом для осины, – весьма эффективный элемент-индикатор при биогеохимических поисках погребенных рудных залежей [15]. В растительном материале участвующих в анализе проб он находится в значимой обратной взаимосвязи с REE (рис. 3, табл. 2). С целью косвенной дифференциации источников пополнения элементного состава биоматериала привлечены суммарные индикаторы – REE (пылевая составляющая) и Ca-Sr (корневое питание).

Сигнатуры графиков изменчивости коэффициента концентрации Fe и REE в листьях осины близки между собой, что особенно хорошо видно на интервале высокой неоднородности геохимического поля биоматериала (рис. 2). При этом биогеохимическая аномалия характеризуется существенно более интенсивным относительным приращением концентраций иттриевой группы REE в сравнении

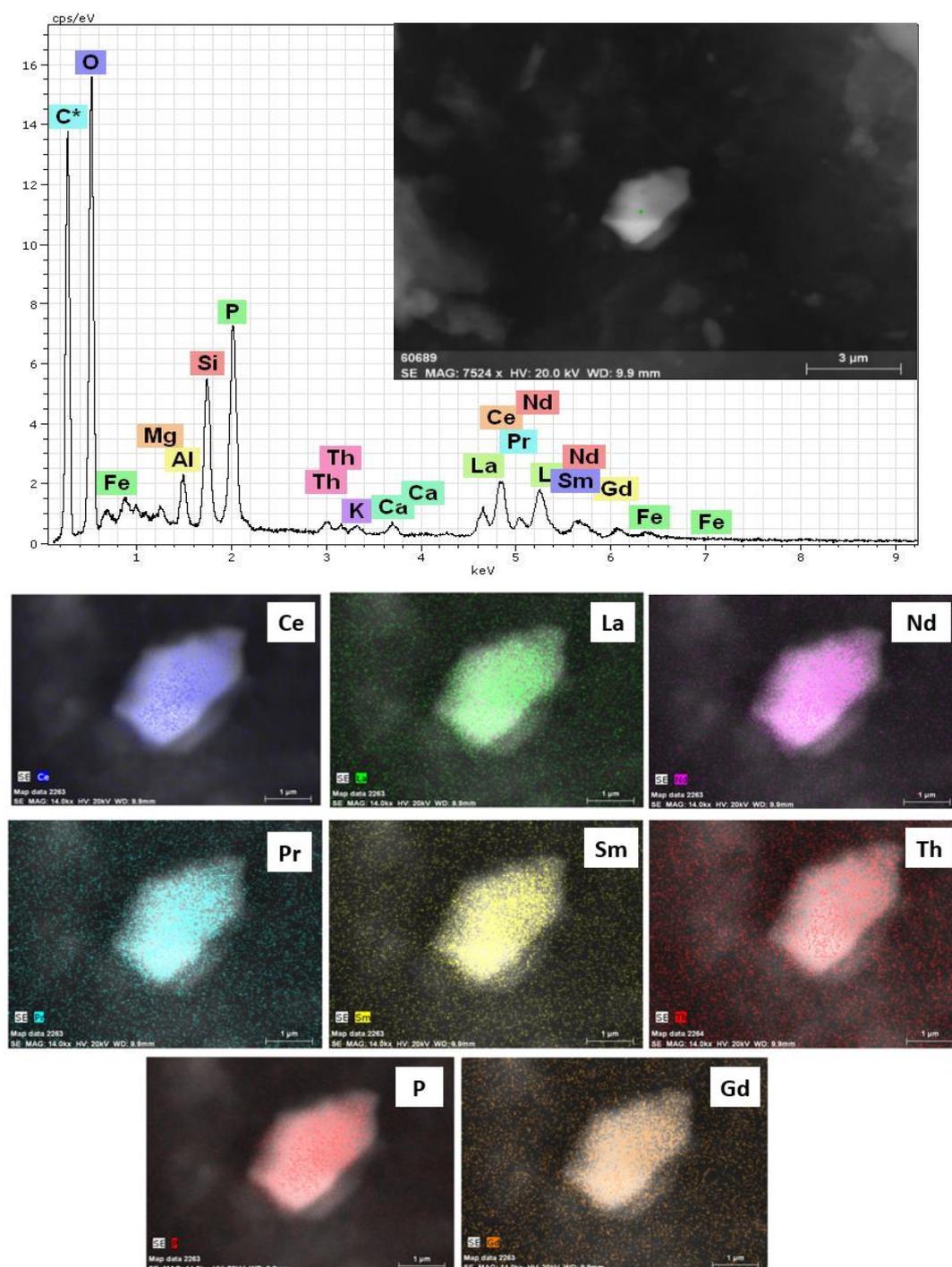
с цериевой. Нормирование Fe по REE приводит к «деградации» данной контрастной неоднородности, обратный эффект при привлечении в знаменатель Ca+Sr. Весьма контрастный ореол высоких значений био-литохимического отношения Fe, судя по другим показателям, не связан с корневым поступлением элемента в растение из почв. Причина возникновения аномалии – пылевое загрязнение листьев. В распределении Zn, Ca, Sr, а также отношениях Zn к REE и Ca+Sr контрастных ореолов, подержанных хотя бы парой коррелирующих в пространстве пунктов опробования, не выявлено. Это позволяет предположить их сравнительно низкие концентрации в эоловой пыли, так и фоновое концентрирование элементов в растениях посредством корневого питания по всем профилям комплексных эколого-геохимических исследований.

### Результаты и обсуждение

Профильные региональные биогеохимические и литохимические исследования проведены в пределах территорий с низкой техногенной нагрузкой в удалении от областей седиментационного питания. Во многом это определило фоновые параметры геохимического поля на большей части изученной территории. Выявленный по биогеохимическим данным интервал аномальной неоднородности распределения химических элементов по геохимической специализации согласуется с особенностями элементного состава почв ландшафтов таежной зоны. Геохимической спецификой почвенного профиля кислой глеевой тайги является дефицит  $O_2$ , избыток  $Fe^{2+}$  и  $H^+$  [6]. В вертикальном разрезе почв в верхнем горизонте A1 аккумулируются гумус, N, C, H, K, Ca, P, Mn, Zn, Cu, Ni, Co. Эти же элементы, а также Fe, Al и  $SiO_2$  выносятся с просачивающимися атмосферными осадками. Ниже (горизонт A2) в результате кислотного гидролиза происходит разложение минералов и вынос подвижных соединений Fe и Al в форме хелатов. Кислый горизонт сменяется менее кислым иллювиальным горизонтом B, где на щелочном и сорбционном барьерах вынесенные элементы аккумулируются. Возникновение аномалии в интервале с. Парбиг – с. Пчелка обусловлено отбором проб в широком ореоле высокой пылевой нагрузки, связанным с движением автотранспорта по грунтовой дороге в условиях искусственного разрушения (исключения из почвенного профиля) почвенного горизонта A. Редкоземельные элементы, находясь в типичной ассоциации элементов-гидролизатов, являются хорошим индикатором природного и антропогенного пылевого загрязнения. Прямая корреляция между пылевой составляющей природных планшетов (снежный покров, листья деревьев) используется при интерпретации эколого-геохимических дан-

ных [19]. В этом же регионе (Томская область) на основе изучения химического состава листьев тополя бальзамического и находок в осевшей на листьях дисперсной пыли минералов-носителей REE (монацит, ксенотим, циркон) предложен способ идентификации территорий, испытывающих воз-

действие активных дефляционных процессов [19]. Для этого используется Zr/Ce отношение, а его низкие значения увязывают с территориями влияния природного пылевого фактора. Схожие мелкодисперсные твердые фазы REE были обнаружены на листьях и в наших исследованиях (рис. 4).



**Рис. 4.** Форма нахождения редкоземельного минерала на поверхности листа осины, его энергодисперсионный спектр и карты распределения элементов-индикаторов этого минерала (д. Пчелка, Бакcharский район)  
**Fig. 4.** Form of a rare-earth mineral on an aspen leaf surface, its energy-dispersive spectrum and maps of distribution of indicator elements of this mineral (Pchelka village, Bakchar district)

**Таблица 3.** Среднее содержание REE в объектах исследований и продуктивных отложениях циркон-ильменитовых месторождений Томской области

**Table 3.** REE average content in the research objects and productive deposits of zircon-ilmenite deposits of the Tomsk region

Анализируемый материал Analyzed material	Содержание, г/т Concentration, ppm		$\frac{(La + Ce + Sm + Eu)/4}{(Yb + Lu)/2}$
	La+Ce+Sm+Eu	Yb+Lu	
Продуктивные отложения Туганского и Георгиевского циркон-ильменитовых месторождений (использованы фактические материалы Л.П. Рихванова и др. [53]) Productive horizons of the Tugan and Georgievsky zircon-ilmenite deposits (the actual materials of L.P. Rikhvanov et al. [53] were used)			
Легкая глинистая фракция/Light clay fraction	177,15	8,90	9,95
Тяжелая фракция/Heavy fraction	4612,20	188,83	12,21
Ильменит/Ilmenite	205,74	29,00	3,55
Лейкоксен/Leucoxene	1578,54	51,86	15,22
Анаказ/Anataz	335,00	45,00	3,72
Циркон/Zircon	113,55	522,60	0,11
Монацит/Monazite	260257,00	1657,00	7,53
Листья и почвы профилей исследования/Leaves and soil of the studied lines			
Листья фоновых уровней накопления химических элементов Leaves of background levels of accumulation of chemical elements	10,03	0,14	34,62
Листья биогеохимической аномалии Leaves with biogeochemical anomaly	24,99	0,72	17,29
Почвы/Soils	103,39	3,33	15,53

Однако в аномальном биогеохимическом ореоле происходит наиболее интенсивное концентрирование иттриевой группы REE (рис. 2). Последняя, в сравнении с цериевой группой, обладает способностью к образованию относительно мобильных органических комплексов и в условиях ландшафтов таежной зоны сильнее вовлечена в гипергенную миграцию [6]. Как следствие, более активное участие в реакции гидролиза в сорбционном накоплении химических элементов глинами и гумусом. Возможно, поэтому не следует при индикации природного пылевого загрязнения опираться только на один из редкоземельных элементов.

При изучении химического состава накопленного природными планшетами пылеаэрозольного вещества отношения между REE используют для прогноза конкретных источников техногенного загрязнения. При этом опираются на отклонения от типичных для природных образований соотношений, чаще характеризующихся преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми [49]. Большой пласт подобных работ выполнен для снежного покрова и растительного биоматериала в Томской области [50–52].

Как уже отмечалось, присутствие титанциркониевой осадочной рудной формации во многом определяет геохимическую специализацию этого региона. В этом аспекте представляет интерес анализ особенностей концентрирования REE в материале проб настоящих исследований и сделанных нами обобщенных оценок по представительным данным геохимической характеристики продуктивных отложений Туганского и Георгиевского циркон-ильменитовых месторождений на юго-востоке Томской области [53]. Глинистая состав-

ляющая продуктивных горизонтов в сравнении с тяжелой фракцией характеризуется увеличением относительной доли тяжелых лантаноидов в сумме REE (табл. 3). Минералы тяжелой фракции существенно различаются уровнями накопления REE, но в целом демонстрируют преобладание легких REE над тяжелыми. Исключением является циркон. Лейкоксен (полиминеральный агрегат в т. ч. гидроокислов железа) от неизмененного ильменита отличается заметным опережающим концентрированием REE цериевой группы. Также существенное смещение значений индикаторного отношения в эту сторону закономерно обеспечивает монацит.

Биогеохимические пробы из аномального интервала профилей исследований выделяются относительно высоким приращением содержания иттриевых REE, а по среднему значению индикаторного отношения близки к почвам региона. Опираясь на тренд изменения соотношения REE от легкой к тяжелой фракции прибрежно-морских циркон-ильменитовых россыпей можно предположить, что возникновение биогеохимической неоднородности в основном обеспечено дисперсным глинистым материалом почв в результате пыления грунтовой автодороги. Роль акцессорных минералов при пылевом загрязнении не столь существенна.

Снижение флуктуации геохимического фона, связанной с золовым питанием снежного покрова и биогеохимического материала, можно осуществить путем нормирования концентраций химических элементов по сумме REE [45, 46, 54]. Данная процедура, проведенная по отношению к КК (Fe) в биоматериале, не позволила выявить аномальные отклонения, обусловленные возможными диспер-

сионными ореолами железных руд Бакчарского месторождения (рис. 2). Не обнаружено появления резких неоднородностей распределения и для других включенных в анализ химических элементов. Вероятно, во многом это связано с тем, что химическая композиция руд представлена преимущественно литофильными элементами барьерного типа, к тому же слабыми водными мигрантами.

Ранее в районе проведения опытной скважины гидродобычи оолитовых железных руд в почвах выявлен локальный ореол повышенного содержания Fe и Sc, в то же самое время в золе листьев осины эти элементы отметились пониженным содержанием (рис. 5).

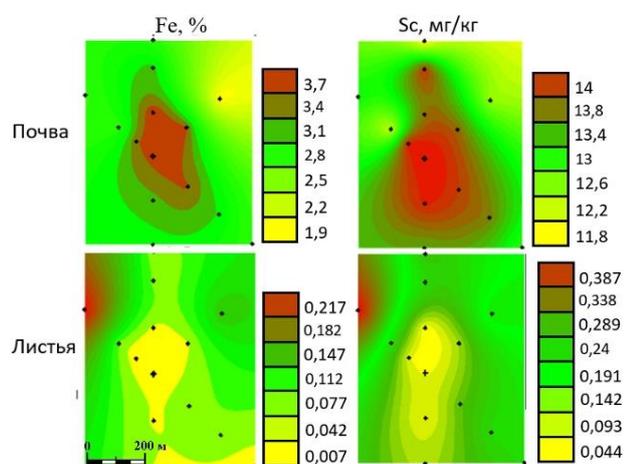


Рис. 5. Распределение Fe и Sc в золе листьев осины и в почве на территории карты намыва пробной СГД № 101 (с. Бакчар)

Fig. 5. Fe and Sc distribution in ash of aspen leaves and in soil on the territory of the alluvium map of the trial SRS no. 101 (Bakchar village)

Однако, учитывая редкий шаг опробования по региональному профилю, вопрос возможности биогеохимического поиска Бакчарских рудных залежей требует отдельного изучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. – Berlin: Springer, 1998. – 324 p.
2. Goodman G.T., Roberts T.M. Plants and soils as indicators of metals in the air // Nature. – 1971. – V. 231. – № 5301. – P. 287–292.
3. Markert B. Plants as biomonitors: indicators for heavy metals in the terrestrial environment. – Weinheim; New York: VCH, 1993. – 644 p.
4. Element composition of the leaves of some deciduous trees and the biological indication of heavy metals in an urban-industrial environment / M. Kovacs, J. Podani, P. Klincsek, M. Dinka, K. Torok // Acta Botanica Academiae Scientiarum Hungaricae. – 1981. – V. 27. – P. 43–52.
5. Use of leaves as a bioindicator for assessing air pollution based on a composite proxy index (APTI), Dust amount and elemental concentration of metals / V.E. Molnár, D. Tózsér, S. Szabó, B. Tóthmérész, E. Simon // Plants. – 2020. – V. 9. – № 12. DOI: 10.3390/plants9121743.
6. Геохимия ландшафтов: к 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана / Н.С. Касимов, А.Н. Геннадиев, В.И. Величкин и др. / под ред. Н.С. Касимова, А.Н. Геннадиева. – М.: ООО «АПР», 2017. – 544 с.
7. Добровольский В.В. Геохимия почв и ландшафтов: избранные тр. – М.: Научный мир, 2009. – 24 с.
8. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.

#### Заключение

Листья деревьев, в частности осины обыкновенной, являются хорошим природным планшетом для изучения пылеаэрозольного загрязнения. Учитывая, что компонентный состав деревьев формируется в т. ч. путем корневого питания, необходима разработка критериев разделения источников поступления вещества. Примененные методы статистической обработки данных показали, что такая дифференциация опосредованно возможна с использованием показателей, основанных на элементах корреляционного и дисперсионного анализов. Выявленная биогеохимическая аномалия обусловлена пылевым ореолом, сопровождающим дорогу с грунтовым покрытием (с. Парбиг – с. Пчелка), что согласуется с литературными данными [13, 55]. Данная грунтовая дорога не имеет основания из привозного инертного материала и является проезжей только в сухие периоды лета. По сути, она является искусственной эрозионной формой рельефа с отсутствием почвенного горизонта А. Как следствие, поступающий с нее тонкодисперсный материал в значительной степени несет геохимическую специализацию местных почвенных горизонтов В и С.

Редкоземельные элементы в таежных ландшафтах являются хорошими маркерами пополнения компонентного состава растительного материала путем природного эолового и техногенного пылевого загрязнения. При интерпретации данных по распределению REE, полученных при эколого-геохимических исследованиях природных планшетов, необходимо уделять особое внимание минералогической и геохимической специализации территории, а также гранулометрическому и минеральному составу сухого остатка. Пренебрежение природными факторами, определяющими специфику дифференциации концентрирования легких и тяжелых лантаноидов, чревато существенными ошибками при идентификации с помощью них геохимических ореолов техногенного генезиса.

9. Rossini Oliva S., Raitio H. Review of cleaning techniques and their effects on the chemical composition of foliar samples // *Boreal Environment Research*. – 2003. – V. 8. – P. 263–272.
10. Ozaki H., Watanabe I., Kuno K. As, Sb and Hg distribution and pollution sources in the roadside soil and dust around Kamikochi, Chubu Sangaku national Park, Japan // *Geochemical J.* – 2004. – V. 38. – P. 473–484.
11. Abioye O. Fayiga, Mabel O. Ipinmoroti, Tait Chirenje. Environmental pollution in Africa Environment // *Development and Sustainability*. – 2018. – V. 20. – P. 41–73.
12. Detrimental effects of Road dust on plants and its environmental impacts / Allah Nawaz Khan, Farzana Rafiq, Muhammad Asif Akram, Muhammad Sufyan, Naila Fida Hussain, Muhammad Tayyab Shaheen, Shazia Iqbal, Sobia Sohail, Hafiz Muhammad Shahbaz // *International Journal of Biosciences*. – 2020. – V. 16. – № 1. – P. 162–167.
13. Сиромля Т.И., Загурская Ю.В. Проблемы исследования процессов аккумуляции и гипераккумуляции растениями химических элементов // *Журнал общей биологии*. – 2021. – Т. 82. – № 4. – С. 283–296.
14. Simultaneous hyperaccumulation of nickel and cobalt in the tree *Glochidion cf. sericeum* (Phyllanthaceae): elemental distribution and chemical speciation / A. Van Der Ent, R. Mak, M.D. De Jonge, H.H. Harris // *Scientific reports*. – 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-26891-7.
15. Ковалевский А.Л. Биогеохимические поиски рудных месторождений: 2-е изд. – М.: Недра, 1984. – 172 с.
16. Юсупов Д.В. Биогеохимические ореолы золота и ртути Покровского золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2009. – № 6. – С. 38–43.
17. Юсупов Д.В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 344 с.
18. Determination of Rare Earth Elements in multi-year high-resolution Arctic aerosol record by double focusing Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry with desolvation nebulizer inlet system / F. Giardi, R. Traversi, S. Becagli, M. Severi, L. Caiazzo, C. Ancillotti, R. Udisti // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 613. – P. 1284–1294.
19. Дорохова Л.А., Юсупов Д.В., Рихванов Л.П. Геохимические и минералогические индикаторы ветровой дефляции на урбанизированных территориях с использованием листьев тополя // *Известия Томского политехнического университета*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 137–146.
20. Major, traces, rare earth elements and stable isotopes of Triassic carbonates along the northeastern margin of the Arabian Plate: a key to understanding the paleotectonics and paleoenvironment of the Avroman (Beaston) limestone formation from Kurdistan, northeastern Iraq / T.A. Mirza, K.H. Karim, S.M. Ridha, C.M. Fatah // *Carbonates and evaporites*. – 2021. – V. 36. DOI: 10.1007/s13146-021-00733-6.
21. Radusinović S., Papadopoulos A. The potential for REE and associated critical metals in karst bauxites and bauxite remains of Montenegro // *Minerals*. – 2021. – V. 11. – № 9. DOI: 10.3390/min11090975.
22. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities / T. Sawidis, J. Breuste, M. Mitrovic, P. Pavlovic, K. Tsigaridas // *Environmental Pollution*. – 2011. – V. 159. – P. 3560–3570.
23. Everett J.L., Day C.L., Reynolds D. Comparative survey of lead at selected sites in the British Isles in relation to air pollution // *Food and Cosmetics Toxicology*. – 1967. – № 5. – P. 29–35.
24. Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. – М.: Недра, 1981. – 143 с.
25. Карта минерагенического районирования Сибирский федеральный округ Томская область. Составлена на основе «Прогнозно-минерагенической карты Российской Федерации и ее континентального шельфа масштаба 1:2500000» / Отв. исполнитель А.В. Молчанов. – СПб: ФГБУ ВСЕГЕИ, 2016. – 1 с.
26. Паровинчак М.С., Гринев О.М., Рихванов Л.П. Потенциал и перспективы освоения неуглеводородных минерально-сырьевых ресурсов Томского Приобья // *Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства: Материалы Международной научно-технической конференции*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – С. 279–285.
27. Николаева И.В. Бакчарское месторождение оолитовых железных руд. – Новосибирск: Наука, 1967. – 130 с.
28. Западно-Сибирский железорудный бассейн / под ред. Ф.Н. Шахова. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1964. – 448 с.
29. Тектоническое районирование и геохимия чехла Западно-Сибирской платформы / Г.С. Гусев, О.Н. Сироткина, Н.В. Межеловский, В.А. Киликко // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геология*. – 2016. – Т. 91. – Вып. 4–5. – С. 123–135.
30. Уфимцева К.А. Почвы южной части таежной зоны Западно-Сибирской равнины. – М.: Колос, 1974. – 202 с.
31. Изменения химического состава кислотных вытяжек по глубине торфяной залежи внутриболотных экосистем Васюганского болота (Западная Сибирь) / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, М.А. Рудмин, А.А. Хвашевская, А.Б. Даулетова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 101–116.
32. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к охране почв. – М.: Стандартинформ, 2018. – 3 с.
33. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2018. – 14 с.
34. Kalubi K.N., Mehes-Smith M., Omri A. Comparative analysis of metal translocation in red maple (*Acer rubrum*) and trembling aspen (*Populus tremuloides*) populations from stressed ecosystems contaminated with metals // *Chemistry and Ecology*. – 2016. – V. 32. – № 4. – P. 312–323.
35. Mandre M. Heavy metals uptake and accumulation by the hybrid aspen in alkalised soil // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2014. – V. 225. – № 1. – P. 1–9.
36. Phytoextraction of potentially toxic elements by six tree species growing on hazardous mining sludge / M. Mleczek, P. Goliński, M. Krzesłowska, M. Gąsecka, Z. Magdziak, P. Rutkowski, S. Budzyńska, B. Waliszewska, T. Kozubik, Z. Karolewski, P. Niedzielski // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24. – № 28. – P. 22183–22195.
37. Алексеев В.А. Экологическая геохимия. – М.: Логос, 2000. – 627 с.
38. Солодов Н.А., Семенов Е.И., Бурков В.В. Геологический справочник по тяжелым литофильным редким металлам. – М.: Недра, 1987. – 440 с.

39. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 265 с.
40. Gavrilov R.Y., Khmelev M.V., Abramova R.N. Volumetric geochemical model of Chortovo Koryto ore-gold deposit (Patom range) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – V. 21. – P. 1–6.
41. Литогеохимические исследования при поисках месторождений нефти и газа / под ред. О.Л. Кузнецова. – М.: Недра, 1987. – 184 с.
42. Exceptional uptake and accumulation of chemical elements in plants: an extension of the hyperaccumulation paradigm / A. van der Ent, A.J. Pollard, G. Echevarria, F. Abubakari, P.D. Erskine, A.J.M. Baker, R.D. Reeves // *Agronomy: Farming for Metals: extracting unconventional resources using plants*. – 2021. – P. 99–131.
43. Cataldo D.A., Wildung R.E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants // *Perspectives of Environmental Hygiene*. – 1978. – V. 27. – P. 149–159.
44. Heavy metals accumulation and translocation in native plants grown on tailing dumps and human health risk / G. Pehoiu, O. Murarescu, C. Radulescu, I.D. Dulama, S. Teodorescu, R.M. Stirbescu, I.A. Bucurica, S.G. Stanescu // *Plants and soil*. – 2020. – V. 456. – P. 405–424.
45. Овсянникова Т.М. Биогеохимические методы поисков скрытых месторождений // *Разведка и охрана недр*. – 2019. – № 2. – С. 3–11.
46. Геохимическая таблица / под ред. В.В. Щербиной. – М.: Недра, 1973. – 1 с.
47. Geochemical studies of snow over mineral accumulations under conditions of their overlap by sedimentary rocks of the platform cover / I.S. Sobolev, R.Yu. Gavrilov, A.A. Isupova, F.F. Khvashchevskaya, O.S. Tolcacev, N.V. Baranovskaya, N.P. Soboleva // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2022. – V. 234. – № 3. DOI: 10.1016/j.gexplo.2021.106940.
48. Макеев С.М., Бобылев В.Ф., Димча В.Д. Комплекс гравиразведки и геохимии при оценке нефтегазоносности // *Deep Subsoil and Science Horizons: Fourth International Geoscience Conference*. – Tyumen, March 23–27, 2013. – М.: EAGE, 2015. – С. 339.
49. Распределение редкоземельных элементов в пробах снега – чувствительный показатель загрязнения окружающей среды / С.Ф. Винокуров, Д.Б. Петренко, В.А. Сычкова, Н.П. Тарасова // *Доклады Академии наук*. – 2014. – Т. 456. – № 3. – С. 320–325.
50. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 373 с.
51. Агеева Е.В. Редкоземельные и радиоактивные (Th, U) элементы в компонентах природной среды как индикаторы эколого-геохимических обстановок (на примере Томской и Кемеровской областей): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 23 с.
52. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 205 с.
53. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения - как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Л.П. Рихванов, С.С. Кропанин, С.А. Бабенко, А.И. Соловьев, В.М. Советов, Т.Ю. Усова, М.А. Полякова. – Кемерово: Сарс, 2001. – 217 с.
54. Исупова А.А. Влияние геологического строения на элементный состав природных объектов приповерхностного горизонта на примере Батуринского рудопоявления золота в Томской области: дис. ... магистра экологии и природопользования. – Томск, 2021. – 142 с.
55. A study of air pollution with heavy metals in Thessaloniki city (Greece) using trees as biological indicators / T. Sawidis, A. Marnasidis, G. Zachariadis, J. Stratis // *Environmental contamination and toxicology*. – 1995. – V. 28. – № 1. – P. 118–124.

## REFERENCES

1. Bargagli R. *Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery*. Berlin, Springer, 1998. 324 p.
2. Goodman G.T., Roberts T.M. Plants and soils as indicators of metals in the air. *Nature*, 1971, vol. 231, no. 5301, pp. 287–292.
3. Markert B. *Plants as biomonitors: indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim, New York, VCH, 1993. 644 p.
4. Kovacs M., Podani J., Klincsek P., Dinka M., Torok K. Element composition of the leaves of some deciduous trees and the biological indication of heavy metals in an urban-industrial environment. *Acta Botanica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 1981, vol. 27, pp. 43–52.
5. Molnár V.E., Tözsér D., Szabó S., Tóthmérész B., Simon E. Use of leaves as a bioindicator for assessing air pollution based on a composite proxy index (APTI), Dust amount and elemental concentration of metals. *Plants*, 2020, vol. 9, no. 12. DOI: 10.3390/plants9121743.
6. Kasimov N.S., Gennadiev A.N., Velichkin V.I. *Geokhimiya landshaftov: k 100-letiyu so dnya rozhdeniya Aleksandra Ilichy Perelmana* [Geochemistry of landscapes: on the occasion of the 100th anniversary of the birth of Alexander Ilyich Perelman]. Eds. N.S. Kasimov, A.N. Gennadiev. Moscow, APR Publ., 2017. 544 p.
7. Dobrovolskiy V.V. *Geokhimiya pochv i landshaftov* [Geochemistry of soils and landscapes]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 24 p.
8. Glazovskaya M.A. *Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov SSSR* [Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 328 p.
9. Rossini Oliva S., Raitio H. Review of cleaning techniques and their effects on the chemical composition of foliar samples. *Boreal Environment Research*, 2003, vol. 8, pp. 263–272.
10. Ozaki H., Watanabe I., Kuno K. As, Sb and Hg distribution and pollution sources in the roadside soil and dust around Kamikochi, Chubu Sangaku national Park, Japan. *Geochemical J*, 2004, vol. 38, pp. 473–484.
11. Abioye O. Fayiga, Mabel O. Ipinmoroti, Tait Chirenje. Environmental pollution in Africa Environment. *Development and Sustainability*, 2018, vol. 20, pp. 41–73.

12. Allah Nawaz Khan, Farzana Rafiq, Muhammad Asif Akram, Muhammad Sufyan, Naila Fida Hussain, Muhammad Tayyab Shaheen, Shazia Iqbal, Sobia Sohail, Hafiz Muhammad Shahbaz. Detrimental effects of road dust on plants and its environmental impacts. *International Journal of Biosciences*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 162–167.
13. Siromlya T.I., Zagurskaya Yu.V. Problemy issledovaniya protsessov akkumulyatsii i giperakkumulyatsii rasteniyami khimicheskikh elementov [Problems of studying the processes of accumulation and hyperaccumulation of chemical elements by plants]. *Journal of General Biology*, 2021, vol. 82, no. 4, pp. 283–296. In Rus.
14. Van Der Ent A., Mak R., De Jonge M.D., Harris H.H. Simultaneous hyperaccumulation of nickel and cobalt in the tree *Glochidion cf. sericeum* (Phyllanthaceae): elemental distribution and chemical speciation. *Scientific reports*, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-26891-7.
15. Kovalevskiy A.L. *Biogekhimicheskie poiski rudnykh mestorozhdeniy* [Biogeochemical searches for ore deposits]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ., 1984. 172 p.
16. Yusupov D.V. Biogeochemical halos of gold and mercury of the Pokrovskoye gold deposit (Upper Amur region). *News of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2009, no. 6, pp. 38–43. In Rus.
17. Yusupov D.V. *Metodologiya biogekhimicheskoy indikatsii urbanizirovannykh i gornopromyshlennykh territoriy na osnove analiza drevesnoy rastitelnosti*. Diss. Dokt. nauk [Methodology for biogeochemical indication of urbanized and mining areas based on the analysis of woody vegetation. Dr. Diss.]. Tomsk, 2022. 344 p.
18. Giardi F., Traversi R., Becagli S., Severi M., Caiazza L., Ancillotti C., Udisti R. Determination of Rare Earth Elements in multi-year high-resolution Arctic aerosol record by double focusing Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry with desolvation nebulizer inlet system. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 613, pp. 1284–1294.
19. Dorokhova L.A., Yusupov D.V., Rikhvanov L.P. Geochemical and mineralogical indicators of wind deflation in urban areas using poplar leaves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 137–146. In Rus.
20. Mirza T.A., Karim K.H., Ridha S.M., Fatah C.M. Major, traces, rare earth elements and stable isotopes of Triassic carbonates along the northeastern margin of the Arabian Plate: a key to understanding the paleotectonics and paleoenvironment of the Avroman (Beaston) limestone formation from Kurdistan, northeastern Iraq. *Carbonates and evaporates*, 2021, vol. 36. DOI: 10.1007/s13146-021-00733-6.
21. Radusinović S., Papadopoulos A. The potential for REE and associated critical metals in karst bauxites and bauxite remains of Montenegro. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 9. DOI: 10.3390/min11090975.
22. Sawidis T., Breuste J., Mitrovic M., Pavlovic P., Tsigaridas K. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, pp. 3560–3570.
23. Everett J.L., Day C.L., Reynolds D. Comparative survey of lead at selected sites in the British Isles in relation to air pollution. *Food and Cosmetics Toxicology*, 1967, no. 5, pp. 29–35.
24. Surkov V.S., Zhero O.G. *Fundament i razvitie platformennogo chekhla Zapadno-Sibirskoy plity* [Foundation and development of the platform cover of the West Siberian Plate]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 143 p.
25. *Karta mineragenicheskogo rayonirovaniya Sibirskiy federalnyy okrug Tomskaya oblast. Sostavlena na osnove «Prognozno-mineragenicheskoy karty Rossiyskoy Federatsii i ee kontinentalnogo shelfa masshtaba 1:2500000»* [Map of mineragenic zoning of the Siberian Federal District, Tomsk Region. Compiled on the basis of the “Forecast-mineragenic map of the Russian Federation and its continental shelf on a scale of 1:2500000”]. Executive in charge A.V. Molchanov. St Petersburg, VSEGEI Publ., 2016. 1 p.
26. Parovinchak M.S., Grinev O.M., Rikhvanov L.P. Potentsial i perspektivy osvoeniya neuglevodorodnykh mineralno-syrevykh resursov Tomskogo Priobya [Potential and prospects for the development of non-hydrocarbon mineral resources of the Tomsk Ob region]. *Gorno-geologicheskoe obrazovanie v Sibiri. 100 let na sluzhbe nauki i proizvodstva. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Mining and geological formation in Siberia. 100 years in the service of science and industry. Proc. of the International Scientific and Technical Conference]. Tomsk, TPU Publ., 2001. pp. 279–285.
27. Nikolaeva I.V. *Bakcharskoe mestorozhdenie oolitovykh zheleznykh rud* [Bakchar deposit of oolitic iron ores]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1967. 130 p.
28. *Zapadno-Sibirskiy zhelezorudnyy basseyn* [West Siberian iron ore basin]. Ed. by F.N. Shakhov. Novosibirsk, SO AN SSSR Publ., 1964. 448 p.
29. Gusev G.S., Sirotkina O.N., Mezhelovskiy N.V., Kilipko V.A. Tectonic zoning and geochemistry of the cover of the West Siberian platform. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Department of Geology*, 2016, vol. 91, Iss. 4–5, pp. 123–135.
30. Ufimtseva K.A. *Pochvy yuzhnoy chasti taezhnoy zony Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Soils of the southern part of the taiga zone of the West Siberian Plain]. Moscow, Kolos Publ., 1974. 202 p.
31. Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Khvashchevskaya A.A., Dauletova A.B. Changes in the chemical composition of acid extracts over the depth of the peat deposit in the intrabog ecosystems of the Vasyugan swamp (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 101–116. In Rus.
32. *GOST 17.4.3.01-2017. Okhrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k okhrane pochv* [Protection of Nature. Soils. General requirements for soil protection]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 3 p.
33. *GOST 17.4.4.02-2017. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza. Mezhhgosudarstvennyy standart* [Protection of Nature. Soils. Methods for taking and preparing samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis. Interstate standard]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 14 p.
34. Kalubi K.N., Mehes-Smith M., Omri A. Comparative analysis of metal translocation in red maple (*Acer rubrum*) and trembling aspen (*Populus tremuloides*) populations from stressed ecosystems contaminated with metals. *Chemistry and Ecology*, 2016, vol. 32, no. 4, pp. 312–323.
35. Mandre M. Heavy metals uptake and accumulation by the hybrid aspen in alkalised soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, vol. 225, no. 1, pp. 1–9.

36. Mleczek M., Goliński P., Krzesłowska M., Gąsecka M., Magdziak Z., Rutkowski P., Budzyńska S., Waliszewska B., Kozubik T., Karolewski Z., Niedzielski P. Phytoextraction of potentially toxic elements by six tree species growing on hazardous mining sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 28, pp. 22183–22195.
37. Alekseenko V.A. *Ekologicheskaya geokhimiya* [Ecological geochemistry]. Moscow, Logos Publ., 2000. 627 p.
38. Solodov N.A., Semenov E.I., Burkov V.V. *Geologicheskii spravochnik po tyazhelym litofilnym redkim metallam* [Geological guide to heavy lithophilic rare metals]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 440 p.
39. Balashov Yu.A. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov* [Geochemistry of rare earth elements]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 265 p.
40. Gavrilov R.Y., Khmelev M.V., Abramova R.N. Volumetric geochemical model of Chortovo Koryto ore-gold deposit (Patom range). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–6.
41. *Litogeokhimicheskie issledovaniya pri poiskakh mestorozhdeniy nefiti i gaza* [Litho-geochemical studies in the search for oil and gas fields]. Ed. by O.L. Kuznetsova. Moscow, Nedra Publ., 1987. 184 p.
42. Van der Ent A., Pollard A.J., Echevarria G., Abubakari F., Erskine P.D., Baker A.J.M., Reeves R.D. Exceptional uptake and accumulation of chemical elements in plants: an extension of the hyperaccumulation paradigm. *Agronomy: Farming for Metals: extracting unconventional resources using plants*, 2021, pp. 99–131.
43. Cataldo D.A., Wildung R.E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants. *Perspectives of Environmental Hygiene*, 1978, vol. 27, pp. 149–159.
44. Pehoiu G., Murarescu O., Radulescu C., Dulama I.D., Teodorescu S., Stirbescu R.M., Bucurica I.A., Stanescu S.G. Heavy metals accumulation and translocation in native plants grown on tailing dumps and human health risk. *Plants and soil*, 2020, vol. 456, pp. 405–424.
45. Ovsyannikova T.M. Biogeochemical methods for prospecting for hidden deposits. *Exploration and protection of subsoil*, 2019, no. 2, pp. 3–11. In Rus.
46. *Geokhimicheskaya tablitsa* [Geochemical table]. Ed. by V.V. Shcherbina. Moscow, Nedra Publ., 1973. 1 p.
47. Sobolev I.S., Gavrilov R.Yu., Isupova A.A., Khvashchevskaya F.F., Tolachev O.S., Baranovskaya N.V., Soboleva N.P. Geochemical studies of snow over mineral accumulations under conditions of their overlap by sedimentary rocks of the platform cover. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, vol. 234, no. 3. DOI: 10.1016/j.gexplo.2021.106940.
48. Makeev S.M., Bobylev V.F., Dimcha V.D. Kompleks gravirazvedki i geokhimii pri otsenke neftegazonosnosti [Complex of gravity prospecting and geochemistry in assessing oil and gas potential]. *Glubokiy nedra i gorizonty nauki. Chetvertaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po geonaukam* [Deep Subsoil and Science Horizons: Fourth International Geoscience Conference]. Tyumen, March 23–27, 2013. Moscow, EAGE Publ., 2015. pp. 339.
49. Vinokurov S.F., Petrenko D.B., Sychkova V.A., Tarasova N.P. Raspreделение redkozemelnykh elementov v probakh snega – chuvstvitelny pokazatel zagryazneniya okruzhayushchey sredy [The distribution of rare earth elements in snow samples is a sensitive indicator of environmental pollution]. *Reports of the Academy of Sciences*, 2014, vol. 456, no. 3, pp. 320–325.
50. Talovskaya A.V. *Ekogeokhimiya atmosferykh aerorozley na urbanizirovannykh territoriyakh yuga Sibiri (po dannym izucheniya sostava nerastvorimogo osadka snegovogo pokrova)*. Diss. Dokt. nauk [Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urban areas of southern Siberia (according to the study of the composition of insoluble snow cover sediment)]. Dr. Diss.]. Tomsk, 2022. 373 p.
51. Ageeva E.V. *Redkozemelnye i radioaktivnye (Th, U) elementy v komponentakh prirodnoy sredy kak indikatory ekologo-geokhimicheskikh obstanovok (na primere Tomskoy i Kemerovskoy oblastey)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Rare-earth and radioactive (Th, U) elements in the components of the natural environment as indicators of ecological and geochemical conditions (on the example of the Tomsk and Kemerovo regions). Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2022. 23 p.
52. Shatilov A.Yu. *Veshchestvennyy sostav i geokhimicheskaya kharakteristika pylevykh atmosferykh vypadeniy na territorii Obskogo basseyna*. Dis. Kand. nauk [Material composition and geochemical characteristics of dust atmospheric fallouts on the territory of the Ob basin. Kand. Diss.]. Tomsk, 2001. 205 p.
53. Rikhvanov L.P., Kropanin S.S., Babenko S.A., Solovov A.I., Sovetov V.M., Usova T.Yu., Polyakova M.A. *Tsirkon-ilmenitovye rossypnye mestorozhdeniya-kak potentsialny istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Zircon-ilmenite alluvial deposits as a potential source of development of the West Siberian region]. Kemerovo, Sars Publ., 2001. 217 p.
54. Isupova A.A. *Vliyaniye geologicheskogo stroeniya na elementnyy sostav prirodnykh obektov pripoverkhnostnogo gorizonta na primere Baturinskogo rudoproyavleniya zolota v Tomskoy oblasti*. Diss. magistra [Influence of the geological structure on the elemental composition of natural objects of the near-surface horizon on the example of the Baturinsky gold ore occurrence in the Tomsk region. Master Diss.]. Tomsk, 2021. 142 p.
55. Sawidis T., Marnasidis A., Zachariadis G., Stratis J. A study of air pollution with heavy metals in Thessaloniki city (Greece) using trees as biological indicators. *Environmental contamination and toxicology*, 1995, vol. 28, no. 1, pp. 118–124.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Елена Владимировна Перегудина**, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; peregudina@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4805-537X>; шифр специальности ВАК: 1.6.21

**Игорь Станиславович Соболев**, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог ООО «Гео Сервис», Россия, 634028, г. Томск, ул. Учебная,

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Elena V. Peregudina**, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. peregudina@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4805-537X>

**Igor S. Sobolev**, Cand. Sc., Chief Geologist, LLC «Geo Service», 5-21, Uchebnaya street, Tomsk, 634028, Russian Federation; [geolsob@yandex.ru](mailto:geolsob@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4881-2027>

5-21; geolsob@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4881-2027>

**Наталья Владимировна Барановская**, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; [nata@tpu.ru](mailto:nata@tpu.ru); <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

**Natalya V. Baranovskaya**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; [nata@tpu.ru](mailto:nata@tpu.ru); <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Поступила в редакцию: 27.06.2023

Поступила после рецензирования: 16.07.2023

Принята к публикации: 04.09.2023

Received: 27.06.2023

Revised: 16.07.2023

Accepted: 04.09.2023