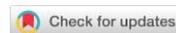


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-51-84



Ссылки для цитирования:

Московченко Д.В., Романенко Е.А. Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 51-84. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-51-84

Cite this article as:

Moskovchenko D.V., Romanenko E.A., Elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 51-84, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-51-84

Благодарность:

Исследование выполнено в рамках программы базовых исследований ТюмНЦ СО РАН (проект АААА-А17-1117050-4000146-5) и гранта РФФИ 18-45-890002\18.

Acknowledgments:

The studies were carried out in the framework of the basic research of Tyumen Scientific Centre (Northern Branch of the Russian Academy of Sciences) project No. АААА-А17-1117050-4000146-5 and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) project No. 18-45-890002\18.

Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья

© 2020 г. Д. В. Московченко*, Е. А. Романенко

*ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, Россия,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86,*

**<https://orcid.org/0000-0001-6338-7669>,*

e-mail: moskovchenko1965@gmail.com.

*Поступила в редакцию 16.03.2020, после доработки 27.07.2020,
принята к публикации 10.09.2020*

Резюме: Проведена оценка элементного состава почв, сфагновых мхов и лишайников Пур-Тазовского междуречья (Западная Сибирь). Содержание химических элементов определено с применением метода рентген-флуоресцентной спектрометрии. Полученные результаты показывают, что почвы характеризуются относительно низкими концентрациями экологически опасных тяжелых металлов, среднее

содержание которых либо ниже кларка земной коры (Cu, Pb, Zn, Ni, Sr), либо равно ему (Hg, Co), что подтверждает выводы предшествующих исследований. Крайне низкое содержание отмечено для физиологически важных Zn и Cu. Повышенные относительно кларка концентрации отмечены для малоподвижных элементов (Mo, Sn и Zr). Выявлены существенные различия в составе минеральных и органогенных горизонтов почв постлитогенного ствола. Средние концентрации P, Zn и S в органогенных горизонтах соответственно в 7.1, 8.1 и 18 раз выше, чем в иллювиальных минеральных горизонтах. Таким образом, химический состав почв в значительной степени определяется биологическим накоплением халькофильных элементов. В верховом торфе олиготрофных болот выше содержание халькофильных элементов, подвижных в кислой среде и интенсивно поглощаемых растениями (Zn, Cu, Cd, Hg). В торфе ерниково-кустарничково-мохово-лишайниковых тундр и лиственничных редколесий повышено содержание литофильных Al, Si, Ti, Zr, поступающих с пылевыми выпадениями из атмосферы. Выявленные особенности элементного состава почв необходимо учитывать при проведении мониторинга загрязнения тяжелыми металлами.

Ключевые слова: Западная Сибирь, тундра, микроэлементы, почвы, лишайники, сфагновые мхи.

Elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve

D. V. Moskovchenko*, E. A. Romanenko

*Tyumen Scientific Centre,
Northern Branch of the Russian Academy of Sciences,
86 Malygina Str., Tyumen 625026, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0001-6338-7669>,
e-mail: moskovchenko1965@gmail.com.*

Receive 16.03.2020, Revised 27.07.2020, Accepted 10.09.2020

Abstract: In order to evaluate the chemical composition of natural background environments of Pur-Taz interfluve (Western Siberia), the mineral components of soils, peats, lichens, and sphagnum mosses have been analyzed. The samples were tested using X-ray fluorescence technology. The average contents of hazardous metals in the soils of the Pur-Taz interfluve are either lower (for Cu, Pb, Zn, Ni, Sr) or equal to (for Hg, Co) the average values of these elements in the Earth's crust. This finding corresponds to the commonly held view that the contents of elements in the soils located in the north of

Western Siberia are lower than the world averages. Additionally, in our samples low concentrations of copper and zinc have been observed. Since these microelements are important for soil physiology, this finding indicates unfavorable biochemical conditions in the research area. On the other hand, high concentrations are observed for inactive elements such as Mo, Sn and Zr. The significant differences have been identified in the composition of mineral and organic soil horizons. For instance, the average concentrations of P, Zn and S in organic horizons are 7.1, 8.1 and 18 times greater than in the illuvial mineral horizons, respectively. The intense accumulation of Zn, Cu, Cd, Hg has been recorded, all of them are chalcophiles in the ombrotrophic peat. This means that the chemical composition of soil is largely determined by biological accumulation of chalcophile elements. The content of lithophilic Al, Si, Ti and Zr, coming with dust precipitation from the atmosphere increases in the peat of dwarf shrub-moss-lichen tundras and larch woodlands. The revealed values of the elemental composition of soils can be recommended as background in the course of the environmental monitoring.

Keywords: Western Siberia, tundra, trace elements, soil, lichens, sphagnum mosses.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из интенсивно осваиваемых районов на севере Западной Сибири в настоящее время является Пур-Тазовское междуречье. Геологоразведочные работы в Пур-Тазовской области выявили 60 месторождений углеводородов ([Пятницкая и др., 2010](#)), которые должны обеспечивать рост добычи и газа, и нефти в регионе, а следовательно, и устойчивое экономическое развитие РФ. Расположенное здесь Заполярное месторождение в настоящее время является самым мощным по добыче газа в России. Однако промышленное освоение порождает многочисленные экологические проблемы, в том числе вызванные поступлением загрязнителей, включающих тяжелые металлы ([Моисеенко, Гашев, 2012](#); [Московченко, 2013](#); [Опекунова и др., 2018](#)). Поэтому выявление основных закономерностей формирования химического состава почв в полярных районах Западной Сибири в последнее пятилетие привлекает внимание российских и зарубежных исследователей. На полуострове Ямал выявлено азротехногенное поступление кадмия и свинца с последующей аккумуляцией в органогенных горизонтах, отмечено регулярное превышение экологических

нормативов содержания в почвах Cd, Ni, Hg и As ([Ji et al., 2019a, 2019b](#); [Алексеев и др., 2017](#)). Исследовано загрязнение почв тяжелыми металлами и полициклическими ароматическими углеводородами на острове Белый ([Abakumov et al., 2017](#); [Moskovchenko et al., 2017](#)). Определено экотоксикологическое состояние почв населенных пунктов Ямало-Ненецкого автономного округа ([Алексеев et al., 2017](#)). Выявлен состав почв и донных отложений на различных месторождениях углеводородов ([Опекунова и др., 2019](#)).

В случае дальнейшего потепления климата и таяния мерзлых грунтов процессы аккумуляции и транслокации химических элементов в почвах будут меняться, что усиливает интерес исследователей к оценке биогеохимических свойств тундровых и болотных почв ([Antcibor et al., 2014](#); [Halbach et al., 2017](#); [Raudina et al., 2018](#)). Отмечалось, что поступление в сфагновый торф микроэлементов увеличивает продуцирование парниковых газов ([Basiliko, Yavit, 2001](#)), и, следовательно, влияет на современные климатические изменения.

Цель данного исследования – выявить особенности фонового содержания и закономерностей внутривертикального распределения химических элементов в почвах северной части Пур-Тазовского междуречья, что необходимо, прежде всего, для корректного проведения мониторинга в районе деятельности объектов газодобывающего комплекса. Высокая чувствительность экосистем Арктики к геохимическому воздействию газодобывающего комплекса хорошо известна и описана в научной литературе ([Башкин, 2017](#)). При оценке геохимического “фона” важно знать особенности протекания процессов, которые определяют особенности состава почв. Основной процесс, на котором сфокусировано исследование, – биогенное накопление элементов в ходе детритогенеза (аккумуляции растительных остатков и торфа), имеющее первостепенное значение для формирования геохимической структуры ландшафтов севера Западной Сибири ([Глазковская, 1988](#)).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб выполнен в летний период 2017 г. на участке пос. Тазовский – пос. Новозаполярный (Заполярное месторожде-

ние) (рис. 1). Район работ находится на границе лесотундры и южной тундры и ограничен координатами $66^{\circ}30'$ с. ш. – $67^{\circ}25'$ с. ш. и $78^{\circ}30'$ в. д. – $79^{\circ}35'$ в. д. Литогенной основой ландшафта являются аллювиально-морские отложения четвертой морской террасы (am^4_{III}), менее распространены озерно-аллювиальные отложения третьей надпойменной террасы р. Таз (la^3_{III}) ([Атлас..., 2014](#)).

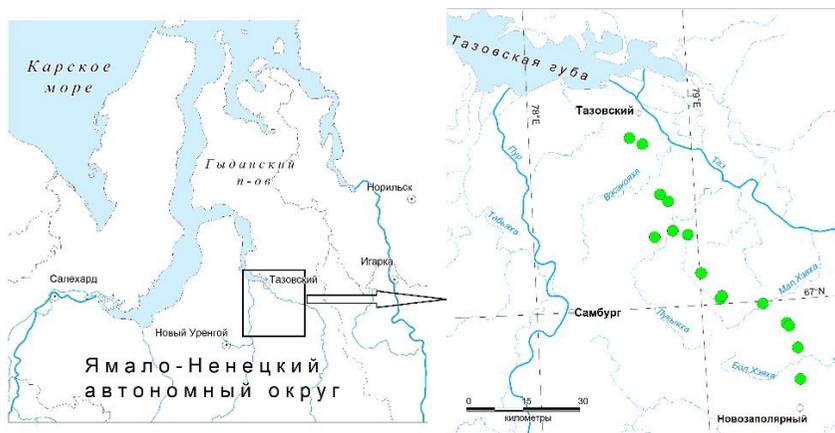


Рис. 1. Схема района исследований.
Fig. 1. Study area.

Почвенные прикопки в пределах сезонно талого слоя заложены на участках, различающихся по геоморфологическому положению, степени дренированности и характеру растительности: на выпуклых дренированных водоразделах с лиственничными кустарничково-лишайниковыми редколесьями, на относительно дренированных водоразделах с ерниковыми кустарничково-лишайниково-моховыми тундрами и на недренированных участках с олиготрофными кустарничково-сфагновыми плоскобугристыми болотами. В структуре почвенного покрова представлены: на породах тяжелого гранулометрического состава – криоземы (Folic Cryosols) (O–CR–C) и органо-криометаморфические глееватые почвы (Turbic Gleyic Cryosols) (O–CRMg–Cg); на песчано-супесчаных породах – подбуры (Entic Podzols) (O–BHF–BC–C),

подзолы (Albic Podzols) (O–E–BF–BC–C), торфяно-подзолы (Histic Podzols) (T–Eg–BHFg–CG), в пределах плоскобугристых торфяников – торфяные олиготрофные мерзлые почвы (Hemic Cryic Histosols) (O–TO–TT \perp) и сухоторфяные почвы (Histic Cryosols) (TJ–TT \perp). Названия почв даны по классификации почв России и WRB ([Классификация, 2004](#); [IUSS, 2014](#)). Мощность сезонноталого слоя во время опробования варьировала от 40 см в торфяных почвах до 110 см в подбурах. По гранулометрическому составу почвы в большинстве случаев относятся к пылеватым и опесчаненным суглинкам.

При исследовании геохимических свойств полярных почв, в зависимости от поставленных задач, используют несколько способов опробования. Для оценки пространственного варьирования химического состава почв в каждом пункте опробования обычно отбирают один образец из поверхностного слоя разной мощности, от 3 до 25 см ([Ji et al., 2019b](#); [Moskovchenko et al., 2017](#); [Gulinska et al., 2003](#); [Hanaka et al., 2019](#); [Wojtun et al., 2013](#); [Вишнева, Попова, 2016](#)). Для определения внутрипрофильного распределения элементов проводят отбор проб из каждого генетического горизонта ([Ji et al., 2019a](#); [Antcibor et al., 2014](#); [Томашунас, Абакумов, 2014](#)), либо ограничиваются отбором с фиксированной глубины без привязки к почвенным горизонтам ([Abakumov et al., 2017](#); [Halbach et al., 2017](#); [Krajcharova et al., 2016](#)). Нами был использован комбинированный подход. Для выявления особенностей геохимического фона территории были опробованы верхние 5 см почвы и слои с глубины 25–30 см, аналогично работам по изучению арктических почв Западно-Европейского сектора, в которых в качестве объектов опробования выступали top soil and deeper soil ([Krajcharova et al., 2016](#); [Halbach et al., 2017](#)). В верхних 5 см почвы были опробованы горизонты O, T, TJ почв органогенного ствола и горизонты O, E, Eg постлитогенных почв. В срединных слоях с глубины 25–30 см опробованы горизонты BHF, BHF_g, BHF_e, CR, CG. Сходный подход с подразделением почвенных горизонтов на органогенные (O), торфяные (T) и срединные (BF, BHF, G) был применен при оценке фоновых концентраций элементов в почвах севера Западной Сибири ([Опекунова и др., 2019](#)).

Для уточнения особенностей радиальной дифференциации

элементного состава в трех широко распространенных типах почв (подбурах, торфяно-подзолах и олиготрофных торфяных почвах) было проведено исследование всех почвенных генетических горизонтов. Поскольку одна из задач исследования – выявление геохимических особенностей детритогенеза, то были отобраны пробы доминирующих в напочвенном покрове сфагновых мхов и лишайников (*Cladina stellaris*).

В лабораторных условиях пробы минеральных горизонтов почв были высушены до постоянной массы в сушильном шкафу, просеяны через сито с диаметром отверстий 1 мм для удаления корней растений и растерты в агатовой ступке до пудры. Пробы торфа и растений также были измельчены и растерты. Химический анализ проб проведен в центре коллективного пользования Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (г. Пущино). Для определения валового содержания элементов использовался рентгенофлуоресцентный анализатор серии “СПЕКТРОСКАН МАКС-GV”. Благодаря возможности определения широкого круга микро- и макроэлементов, сравнительной простоте и низкой стоимости анализов метод нашел широкое применение в изучении состав почв и растений ([Калинин и др., 2018](#); [Avila-Perez et al., 2018](#); [Rogan et al., 2019](#)). Измерение осуществлялось по методикам 242/18-2010 для почв и 309/242-(01.00250-2008)-2012 для растительности. Репрезентативность обеспечивали калибровкой с помощью комплекта Государственных стандартных образцов состава почв, а также стандартных образцов пород и почв, полученных от Института Геологии университета Мехико (Мексика) ([Lozano, Bernal, 2005](#)). Анализ включал два параллельных определения в каждой пробе. Результаты, полученные в двух повторениях, проверялись на предмет расхождений с допусками ($P = 0.95$), рассчитанными для каждого измеряемого элемента отдельно. Если результаты испытания были удовлетворительными, то в качестве результата измерения принималось среднее арифметическое.

Содержание органического вещества определяли путем озоления в муфельной печи при $t = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (т. е. была определена зольность в органогенных горизонтах и потеря при прокаливании в минеральных). Реакция почвенных растворов (pH) была опреде-

лена в водной вытяжке потенциометрическим методом на приборе “Анион-4100”.

Для оценки биогеохимических особенностей обследованной территории были вычислены среднеарифметические значения концентраций элементов в почвах (M), среднеквадратическое отклонение (SD), медианы (Me), рассчитаны кларки концентрации КК – отношение содержания элементов в почвенных горизонтах к кларку верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову (1962), коэффициенты биологического накопления Кб – отношение содержания элемента в золе растений к кларку и коэффициенты радиальной дифференциации R – отношение содержания элемента в генетических горизонтах почв к содержанию в породе или горизонте ВС.

Для оценки процессов преобразования почвенных минералов подсчитан индекс химического изменения (chemical index of alteration) CIA = $100 \cdot Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$, отражающий соотношение первичных и вторичных минералов и характеризующий процесс выщелачивания ([Nesbitt, Young, 1982](#)). Оценка зависимости содержания химических элементов от величины рН и количества органического вещества осуществлялась методом ранговой корреляции Спирмена из-за отсутствия нормального распределения для некоторых элементов. Особенности взаимосвязи химических элементов выявлялись с помощью факторного анализа (метод главных компонент). Также была проведена оценка различий между составом торфа болотных и тундровых почв с использованием непараметрического критерия Манна–Уитни. Подсчеты выполнены в пакете Statistica 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обследованные почвы имеют преимущественно кислую реакцию (величина $pH_{\text{водн}}$ изменяется от 4.1 до 6.1, среднее значение 4.5). Наиболее кислыми являются поверхностные органогенные горизонты, в нижней части профиля величина рН увеличивается. Для обследованных почв характерно широкое варьирование зольности, средние величины которой составили от 15.1% в подстильно-торфяном горизонте до 95–97.4% в иллювиальных и крио-метаморфических горизонтах.

Результаты определения макроэлементного состава почв Пур-Тазовского междуречья представлены в таблице 1.

Таблица 1. Макроэлементный состав почв Пур-Тазовского междуречья
Table 1. Macroelemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve

Показатель	Органогенные горизонты (n = 17)			Поверхностные горизонты, 0–5 см (n = 10)			Иллювиальные и глеевые горизонты средней части профиля, 25–30 см (n = 14)		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>
Na ₂ O, %	0.57	0.14	0.54	0.89	0.20	0.93	0.94	0.18	0.95
MgO, %	0.16	0.30	0.02	0.98	0.60	1.06	1.19	0.51	1.19
Al ₂ O ₃ , %	3.66	3.75	2.06	11.0	2.1	11.8	11.7	1.74	11.8
SiO ₂ , %	19.6	23.2	6.91	63.1	9.7	67.5	69.6	5.87	69.9
K ₂ O, %	0.42	0.73	0.05	1.93	0.4	1.91	2.09	0.25	2.04
CaO, %	2.21	2.0	1.14	0.95	0.14	0.91	1.13	0.21	1.21
Fe, %	2.52	0.84	2.59	3.08	0.84	3.17	3.03	0.94	3.01

В макрокомпонентном составе минеральных горизонтов почв преобладают окислы кремния. Затем, в порядке убывания, следуют Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O. Доминирование кремнезема является свидетельством длительной криогенной трансформации и выветривания горных пород. Суммарное содержание преобладающих в составе SiO₂ и Al₂O₃ составляет 74.1–81.3%, что несколько ниже величин, свойственных арктическим почвам и достигающим 80–90% от вещества мелкозема ([Добровольский, 1994](#)). Этот факт говорит о более слабом проявлении криогенных процессов на исследованной территории по сравнению с арктическими тундрами. Величины индекса химического изменения CIA варьируют в небольших пределах – от 67.6 до 77.7 (среднее значение 73.9 ед.). Известно, что невыветрелые породы характеризуются значениями CIA около 50, в сильновыветрелых разновидностях CIA достигает 100 единиц ([Сысо, 2007](#)). Таким образом, обследованные почвы характеризуются средней степенью выветривания, значения CIA не достигают максимальных величин из-за замедленных процессов химического преобразования минералов в условиях низких

среднегодовых температур. Наименьший уровень выветривания отмечен на участке, почвообразующие породы которого представлены самыми молодыми (голоценовыми) отложениями террас р. Таз, что дает основание для вывода о зависимости степени выветрелости от возраста пород. Особый интерес представляет анализ микроэлементного состава почв, учитывая их экологическую опасность и значение для жизнедеятельности организмов. Обследованные нами почвы отличаются низким содержанием большинства металлов, содержание которых меньше величины кларка (табл. 2).

Значения $KK < 1$ свойственны коре выветривания и почвам арктических районов ([Добровольский, 1994](#)). В минеральных горизонтах выявлен недостаток таких элементов, как Mn, Cu, Rb ($KK = 0.5$), Ni, Sr ($KK = 0.6$), Fe, Zn, Pb, Ga ($KK = 0.7$). Околокларковые значения характерны для Ba, Co, Y, V, Hg. Интенсивное накопление ($KK > 2$) характерно для Cd, Sn, Zr, Mo.

В прошлом был проведен ряд исследований регионального геохимического фона в северных районах Западной Сибири, из которых наиболее полными являются работы коллективов ФГУНПП “Аэрогеология” ([Сорокина и др., 2001](#)) и СПбГУ ([Опекунова и др., 2019](#)). В обеих работах отмечен дефицит большинства микроэлементов в почвах. По данным Сорокиной с соавторами ([2001](#)), средние значения кларков концентрации (коэффициента Шоу) в различных ландшафтных провинциях севера Западной Сибири составляют 0.34–0.74, что говорит об этой территории как об области рассеяния. По оценке Опекуновой с соавторами ([2019](#)), концентрация тяжелых металлов в 3–9 раз ниже кларковых значений, причем химический состав почв отличается значительной контрастностью в зависимости от структуры микро- и мезокомплексов, формирующих тундровые и лесотундровые ландшафты.

Полученные нами результаты в целом подтверждают низкое содержание большинства микроэлементов в почвах, в том числе тяжелых металлов, являющихся индикаторами техногенного воздействия и наиболее часто определяемых в эколого-геохимических исследованиях.

Таблица 2. Микроэлементный состав почв Пур-Газовского междуречья
Table 2. Microelemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve

Элементы, мг/кг	Органогенные горизонты (n = 17)			Поверхностные горизонты, 0–5 см (n = 10)			Иллювиальные и глеевые горизонты средней части профиля, 25–30 см (n = 14)			Кларк по А.П. Виноградову	Региональный геохимический фон (Опекунова и др., 2019)
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>		
Ti	1858	1883	1380	5463	979	5751	5748	864	6006	4500	-
Mn	194	176	197	500	292	331	489	231	438	1000	375/339*
P	2624	2050	1681	697	615	410	369	205	328	930	-
S	3616	1814	3352	571	738	184	204	285	106	470	-
V	42.5	33.0	31.2	96.2	19.3	9.87	98.5	18.8	101.3	90	25/60*
Cr	39.4	29.1	26.7	97.0	19.3	9.49	103.0	21.2	105.4	83	20.6/42*
Co	31.0	12.1	30.0	16.9	4.7	1.61	19.2	5.25	18.8	18	5.8/8.4*
Ni	38.7	15.8	37.1	34.5	8.7	3.15	36.5	13.0	33.6	58	12/13*
Cu	41.0	21.9	47.7	17.4	12.1	1.99	24.1	12.4	22.4	47	8.68/8.7*
Zn	59.8	18.0	57.2	56.8	14.4	5.63	56.5	21.0	54.7	83	36.5/31*
As	18.7	20.5	13.2	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	1.7	-
Sr	286	81.3	288	174	19.1	18.0	190	22.6	195.6	340	-
Pb	10.3	6.7	10.2	13.3	6.0	1.30	10.7	4.11	11.8	16	13.4/9.9*
Rb	320	222	442	70.2	21.0	7.14	76.9	18.6	71.4	150	-
Ba	261	127	226	515	86.0	54.5	568	52.9	567	650	257/460*
Zr	70.9	127	10.4	288	78.1	32.3	342.0	78.8	354	170	-

Элементы, мг/кг	Органогенные горизонты (n = 17)			Поверхностные горизонты, 0–5 см (n = 10)			Иллювиальные и глеевые горизонты средней части профиля, 25–30 см (n = 14)			Кларк по А.П. Виноградову	Региональный геохимический фон (Опекунова и др., 2019)
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Me</i>		
Nb	74.0	49.5	99.5	16.5	4.3	1.74	19.6	3.33	20.3	20	-
Cs	4.1	1.3	4.1	4.63	1.2	0.47	4.58	1.36	4.6	3.7	-
Ga	33.5	18.4	40.4	13.6	2.7	1.39	13.9	2.67	13.8	19	-
Ce	41.5	17.9	43.0	52.2	16.3	5.56	63.5	8.56	65.7	70	-
La	10.6	12.7	2.12	26.6	6.2	2.75	31.4	6.89	31.2	29	-
Sc	5.59	4.3	3.21	11.0	2.3	1.23	10.6	2.20	10.7	10	-
Y	9.1	7.8	10.1	24.1	5.8	2.63	26.5	4.53	27.2	29	-
Yb	0.93	1.2	0.32	3.45	0.9	0.36	3.91	0.41	4.0	3.3	-
Mo	1.83	0.35	1.76	2.3	0.3	0.22	2.12	0.33	2.2	1.1	-
Sn	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	6.28	4.23	5.4	2.5	-
Cd	0.43	0.14	0.42	0.34	0.09	0.036	0.29	0.13	0.30	0.13	0.35/0.08*
Hg	0.33	0.21	0.44	0.074	0.02	0.007	0.082	0.016	0.07	0.083	0.10/0.02*

Примечание. *M* – среднее содержание элементов; *Me* – медиана, *SD* – стандартное отклонение; н. о. – содержание элемента было ниже порога обнаружения более чем в 50% проб; * – указано содержание в органогенных/срединных горизонтах.

Содержание Pb, Cu, Ni, Zn, Sr ниже кларка, Hg, Co – на его уровне. Малое содержание элементов вызвано несколькими причинами. Исследования состава почвообразующих пород севера Западной Сибири ([Хренов, 1987](#); [Московченко, 2013](#); [Сысо, 2007](#); [Опекунова и др., 2019](#)) показали, что содержание в них микроэлементов находится на низком уровне, что наследуется почвами. Минералы пород подвержены интенсивному выщелачиванию в условиях кислой реакции среды и переувлажнения. Интенсивный вынос веществ из рыхлой толщи является закономерным следствием избыточного переувлажнения, характерного для холодно-влажных областей и является генетически обусловленным ([Таргульян, 1971](#)). Вместе с тем стойкие к разрушению минералы сохраняются в породах и почвах, и содержание входящих в их состав микроэлементов возрастает относительно содержания микроэлементов нестойких минералов. Подтверждением этого является повышенное содержание в обследованных почвах Zr – элемента, входящего в состав устойчивых к выветриванию минералов – кварца и циркона, и малоподвижного практически в любой кислотнo-щелочной обстановке ([Сысо, 2007](#)). Повышенное содержание характерно также для малоподвижных в условиях кислых глеевых ландшафтов аниогенных элементов – Mo и Sn.

Обращает на себя внимание низкое содержание важных в физиологическом плане микроэлементов – Cu, для которой КК в постлиггенных почвах варьирует в пределах 0.3–0.6, и Zn (КК = 0.6–0.7). Недостаток Cu в почвах таежно-лесной биогеохимической зоны отмечался еще В.В. Ковальским (1970). Последующие исследования выявили резко выраженный дефицит этого элемента в почвах северных районов. Среднее фоновое содержание Cu в срединных (минеральных) горизонтах почв севера Западной Сибири составляет 8.7 мг/кг ([Опекунова и др., 2019](#)), что многократно меньше среднего значения для почв Земли, составляющего, согласно А. Kabata-Pendias ([2011](#)), 38.9 мг/кг. В почвах Тазовского полуострова содержание Cu во всех проанализированных пробах было ниже предела обнаружения (20 мг/кг) ([Агбалиян и др., 2015](#)). Примечательно, что дефицит Cu отмечен также и в почвах других полярных районов Земли. В частности, в почвах Аляски содержание Cu меньше кларка земной коры и варьирует в преде-

лах 10–30 мг/кг, что вызвано криогенным преобразованием коренных пород, преобладанием кварца над силикатами в обломочных минералах ([Добровольский, 1994](#)). Вероятно, причиной дефицита является также высокая миграционная активность Cu в кислой среде, свойственной почвам полярных и бореальных районов.

Таким образом, результаты исследования состава почв в Пур-Тазовском междуречье в целом подтверждают дефицит физиологически важных микроэлементов и низкое содержание в фоновых условиях тяжелых металлов, относящихся к индикаторам техногенеза. Однако сравнение с фоновым содержанием тяжелых металлов в северных районах Западной Сибири ([Опекунова и др., 2019](#)) выявило, что почвы обследованной территории отличаются повышенным содержанием Mn, Zn, Cu, Co, Cr, V (табл. 2). Сопоставление с характеристиками регионального геохимического фона ([Сорокина и др., 2001](#)) также подтверждает повышенное, относительно среднерегиональных показателей, содержание Mn, Zn, Ni, Co, Cr, Cu, Ba, Mo.

Ранее отмечалось, что элементный состав почвообразующих пород на севере Западной Сибири существенно отличается в зависимости от их генезиса, причем наибольшее содержание микроэлементов свойственно морским породам тяжелого гранулометрического состава ([Московченко, 2013](#)). Было выявлено, что ландшафты севера Западной Сибири, в качестве литогенной основы которых выступают аллювиально-морские отложения третьей и четвертой террас, отличаются повышенным, по сравнению с сопредельными участками, содержанием как сидерофильных (V, Cr, Co, Ni), так и халькофильных (Zn, Cu, Pb) элементов ([Опекунова и др., 2019](#)). Таким образом, состав почвообразующих пород обследованного участка, среди которых преобладают аллювиально-морские отложения четвертой морской террасы, определяет относительно повышенное содержание элементов. Пур-Тазовское междуречье является районом относительной аккумуляции на фоне преобладающего рассеяния элементов, свойственного ландшафтам субполярных районов, сформировавшихся на озерно-аллювиальных и аллювиальных песчаных отложениях.

В предшествующих исследованиях неоднократно отмечались различия элементного состава генетических горизонтов почв

Западно-Сибирских тундр ([Московченко, 2013](#); [Томашунас, Абакумов, 2014](#); [Опекунова и др., 2019](#)). Однако элювиально-иллювиальная дифференциация почв тундр Западной Сибири в целом проявляется слабо ([Васильевская и др., 1986](#)), что связано с коротким периодом положительных температур, замедленной инфильтрацией вод при слабой дренированности территории и криогенными турбациями, приводящими к нарушению стратификации почвенных горизонтов, изменению закономерного распределения в почве гранулометрических фракций. В обследованных нами постлитогенных почвах (торфяно-подзолах, подбурах) различия элементного состава элювиальных и иллювиальных горизонтов невелики. Так, в подбурах максимальная величина коэффициента радиальной дифференциации отмечена для фосфора ($R = 1.9$) и серы ($R = 2.8$), т. е. элементов, согласно А.И. Перельману ([1989](#)), относящихся к группе энергичного биологического накопления. Биологическое накопление других элементов проявляется слабо, концентрация марганца, хрома, меди максимальна в нижней части профиля и минимальна в горизонте ВНFe, что связано с Al-Fe гумусовым процессом (рис. 2).

Более существенны различия элементного состава органо-генных и минеральных горизонтов на участках с ослабленным дренажем, где наблюдается усиление торфонакопления. В торфяно-подзолах глеевых отношение содержания элементов в торфе к содержанию в минеральных горизонтах показывает активное биологическое накопление серы ($R = 20.2$), валового фосфора ($R = 7.8$). В то же время минеральные горизонты постлитогенных почв отличаются недостатком P и S ($KK = 0.4$). Содержание Cr, напротив, выше в минеральных горизонтах. Высокие концентрации P, S, Cu, Hg отмечены в торфяной олиготрофной почве (рис. 2).

Биологическая аккумуляция элементов в поверхностных органо-генных горизонтах почв тундры и тайги зависит, прежде всего, от особенностей накопления их растениями. Отмечалось, что в растениях Уренгойских тундр (багульник, пушица) активно накапливаются халькофильные элементы, в то время как сидерофильные (Fe, Co), напротив, содержатся в концентрациях ниже среднемировых значений ([Московченко и др., 2012](#)).

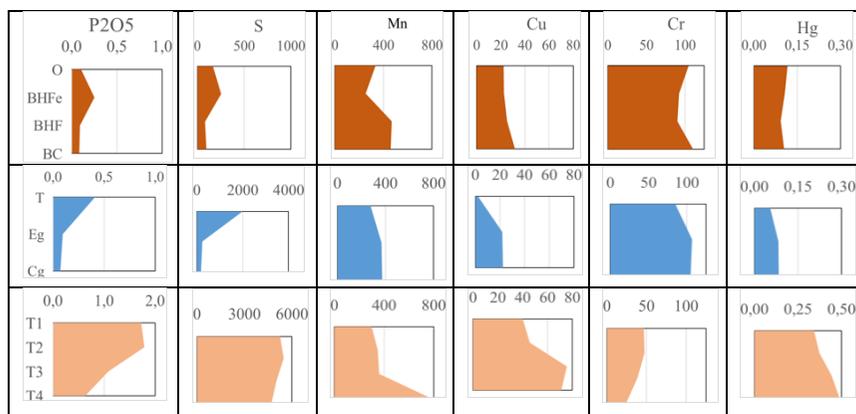


Рис. 2. Распределение элементов в профиле почв: верхний ряд – подбур оподзоленный, средний ряд – торфяно-подзол, нижний ряд – торфяная олиготрофная почва.

Fig. 2. The distribution of elements in the soil profile: upper row – Entic Podzols, middle row – Follic Histic Podzols; lower row – Hemic Cryic Histosol.

В обследованных почвах наиболее активно проявляется биогенная аккумуляция P и S, в торфе накапливаются Hg, Nb, Cu, Cd. Практически все эти элементы, за исключением Nb, относятся к халькофильным. При исследовании торфов лесотундры Европейского Северо-Востока России было отмечено, что накопление микроэлементов связано с атмосферными выпадениями и последующей биоаккумуляцией Hg, Cd, Pb, Cu (Василевич, 2018), т. е. халькофильных элементов. Отмечалось (Опекунова и др., 2019), что халькофилы Zn, Cu, Pb концентрируются в первую очередь в органогенном горизонте почв севера Западной Сибири.

Проведенный корреляционный анализ также подтверждает зависимость между содержанием органического вещества в почвах и концентрацией S и близких к ней Hg, Cu, Cd, для которых выявлена значимая положительная корреляция (табл. 3), причем для S зависимость близка к линейной ($r = 0.90$). Сильная связь также отмечена для Ga, для которого возможным источником обогащения торфяных почв являются природные пожары (Efremova et al., 1999), весьма частые в районе исследований. Отрицательная

зависимость характерна главным образом для литофильных элементов (Si, Ba, K, Ti, Al, Zr, La, Cr, Mg и др.).

Таблица 3. Корреляционная зависимость элементного состава почв с величиной pH и содержанием органического вещества ($p < 0.05$)

Table 3. Spearman's correlation coefficients between organic matter, pH values and element concentrations in soils ($p < 0.05$)

Показатель	Положительная корреляция	Отрицательная корреляция
Органическое вещество	S (0.90), Hg (0.83), Ga (0.79), Sr (0.79), P ₂ O ₅ (0.66), Cu (0.59), As (0.59), Cd (0.53), CaO (0.52)	SiO ₂ (-0.94), Yb (-0.94), Ba (-0.92), K ₂ O (-0.92), Y (-0.90), TiO ₂ (-0.89), Al ₂ O ₃ (-0.87), Zr (-0.85), Cr (-0.83), La (-0.79), V (-0.78), MgO (-0.78), Na ₂ O (-0.74), Ce (-0.73), MnO (-0.56)
pH	Zr (0.70), SiO ₂ (0.67), Yb (0.62), Ba (0.57), K ₂ O (0.57), TiO ₂ (0.53), Y (0.51), La (0.50), Al ₂ O ₃ (0.49), Ce (0.47), Cr (0.43), V (0.43)	Rb (-0.61), Ga (-0.61), S (-0.60), Hg (-0.60), Nb (-0.60), Cd (-0.53), Co (-0.52), Sr (-0.51), Cu (-0.49), P ₂ O ₅ (-0.47).

Примечание. В скобках указаны значения коэффициентов корреляции Спирмена.

Зависимость между элементным составом и кислотно-щелочными условиями выражена не столь сильно, максимальные значения r отмечены для малоподвижных элементов (Zr, Si). Увеличение значений pH приводит к возрастанию содержания преимущественно литофильных элементов, а его снижение – халькофильных. Наблюдается сильная отрицательная связь между величиной pH и количеством органического вещества ($r = -0.80$). Учитывая, что кислотность почв зависит от количества органики и интенсивности ее разложения, отмеченные корреляционные зависимости содержания элементов от pH также в значительной сте-

пени определяются количеством органических веществ.

Для уточнения особенностей взаимосвязи элементов был проведен факторный анализ, который способен “сворачивать” многокомпонентный массив данных до ограниченного пользователем количества факторов, определяющих дисперсию выборки. При анализе нами было выделено два основных фактора, определяющих закономерности формирования элементного состава почв, которые в сумме определяют 74% варьирования. Их графическое отображение показывает четкое разделение элементов на несколько групп (рис. 3).

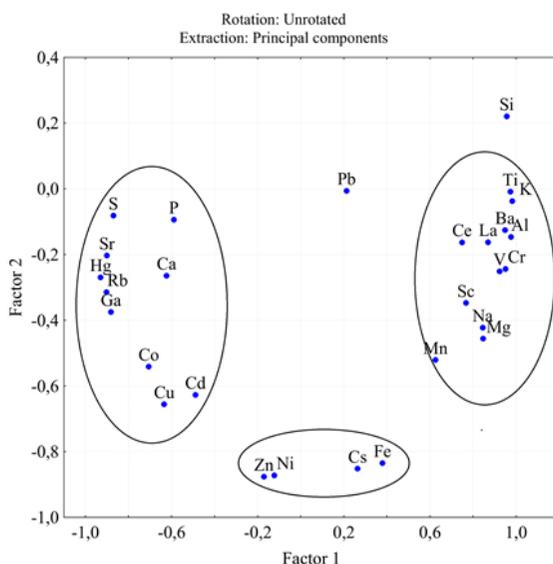


Рис. 3. Диаграмма факторных нагрузок содержания металлов в почвах.
Fig. 3. Diagram illustrating factor loading of metal concentration in soils.

В первую входят преимущественно халькофильные элементы (S, As, Cu, Cd, Hg, Ga), особенности транслокации которых связаны с биогеохимическими процессами. Во вторую группу входят преимущественно литофильные элементы (Si, Zr, Al, Ti, V, Cr, Mn Na, Mg, K), распределение которых связано с минералогии-

ческим составом пород. Третью группу, объединяющую Fe, Ni, Zn, Cs, можно интерпретировать как проявление миграции железоорганических комплексов и осаждения на окислительном барьере.

Таким образом, биологическое накопление играет важнейшую роль в формировании элементного состава почв. Для уточнения особенностей биологического накопления нами проведен анализ состава эдификаторов и доминантов растительного покрова: для верховых болот – мхов рода *Sphagnum*, для кустарничково-лишайниковых тундр и редколесий – лишайника *Cladina stellaris*. Выявлено, что лишайники характеризуется крайне низким содержанием элементов, существенно уступая в этом отношении сфагновым мхам (табл. 4).

Исключением являются Si, Al и Zn, которые содержатся примерно в равных концентрациях. В особенности заметны различия в накоплении активных водных мигрантов – Cl, Mg, Ca, Br, – содержание которых в сфагновых мхах больше на один математический порядок. Накопление в сфагнумах характерно также для Mn, Sr и Ba. Нужно отметить, что Mn и Sr в тундровых и таежных ландшафтах также отличаются повышенной водомиграционной активностью, что связано с высокой подвижностью в кислых глеевых почвах (Московченко, 2013).

Различия в составе лишайников и сфагновых мхов связаны с условиями поступления элементов и особенностями биологического накопления. Состав сфагновых мхов зависит от состава болотных вод со свойственной им кислой реакцией и повышенной концентрацией многих элементов, подвижных в кислой среде (прежде всего Fe и Mn). Играет роль также способность этих растений удерживать химические элементы, поступающие в болото из атмосферы, благодаря особым “воздушным клеткам” (Межибор, Большунова, 2014). Дренированные, возвышенные биотопы эпигейных лишайников *Cladina stellaris* находятся под воздействием атмосферных осадков с характерным для них крайне низким содержанием главных ионов и микроэлементов, а пылевые частицы, очевидно, слабо инкорпорируются на поверхности и межклеточном пространстве талломоов.

Таблица 4. Элементный состав лишайников и сфагновых мхов
Table 4. The elemental composition of the lichen and sphagnum moss

Элементы	<i>Cladina stellaris</i> , n = 5		<i>Sphagnum</i> , n = 5	
	В абс. сухом веществе	В золе	В абс. сухом веществе	В золе
Ca, %	0.0742	3.0	0.2040	10.2
K, %	0.0858	3.4	0.1577	7.9
Al, %	0.0576	2.3	0.0501	2.5
S, %	0.0213	0.85	0.0365	1.8
Mg, %	< 0.001	0.04	0.0144	0.7
Si, %	0.301	12.0	0.3073	15.4
P, %	0.038	1.5	0.0286	1.4
Cl, мг/кг	2.3	92.4	171.3	8 563
Zn, мг/кг	16.6	664	17.6	881
Ni, мг/кг	1.2	46.4	1.5	73.5
Fe, мг/кг	315	12 615	423	21 142
Mn, мг/кг	57.6	2305	309	15 469
Cr, мг/кг	1.0	38.5	4.2	212.0
V, мг/кг	1.5	60.1	2.3	115.8
Sr, мг/кг	6.7	266.4	7.2	362.4
Br, мг/кг	1.5	58.4	4.5	227
Ba, мг/кг	8.4	337	23.4	1 170
Rb, мг/кг	18.0	720	15.4	770
Ti, мг/кг	80.0	3 200	62.7	3 133

Вычисление коэффициентов биологического накопления Кб (рис. 4) показало, что к элементам энергичного и сильного накопления ($K_b = n - 100n$) относятся Br, Cl, S, Mn, P, Zn, Rb, Ca, среднего ($K_b = 0.1n - n$) – Cr, Ni, V, Ba, Sr, Ti, Fe, слабого – Al, Si, что в целом соответствует рядам биологического поглощения по А.И. Перельману (1989), за исключением выявленной нами повышенной биоаккумуляции Mn, Cr, Rb в сфагновых мхах, связанной с ростом водомиграционной активности этих элементов в кислой глеевой обстановке и повышенным содержанием в болотных водах.

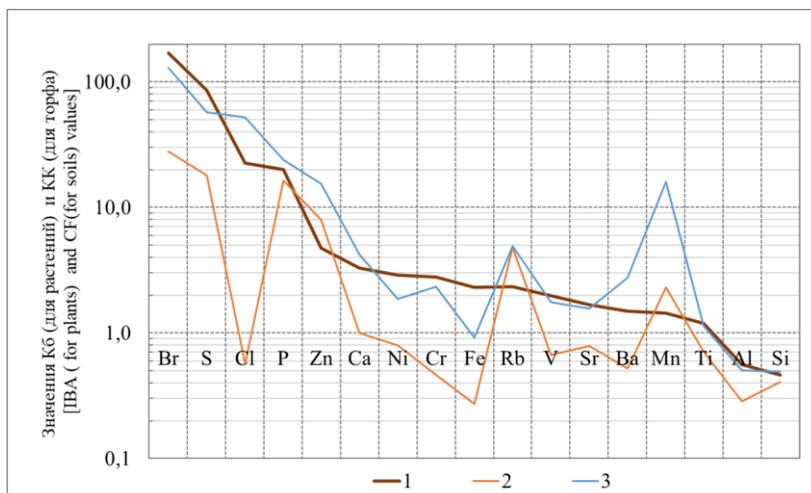


Рис. 4. Биогеохимические спектры сфагновых мхов лишайников *Cladina stellaris* и поверхностных горизонтов торфяных почв. 1 – олиготрофные торфяные почвы; 2 – *Cladina*; 3 – *Sphagnum*.

Fig. 4. Biogeochemical spectra of sphagnum moss and lichen *Cladina stellaris* and surface horizons of peat soils. 1 – Histic horizons of peat soils; 2 – *Cladina*; 3 – *Sphagnum* moss.

Сопоставление значений Кб и кларков концентрации олиготрофного торфа (рис. 4) показывает значительное сходство по большинству элементов, за исключением Fe, которое накапливается в торфе, Mn и Rb, содержание которых в растениях существенно выше. Ранее было отмечено, что в торфе содержание Mn меньше, чем в сфагновых мхах, поскольку в растениях этот элемент находится в легкорастворимой форме и быстро освобождается из разлагающихся растительных остатков; концентрация Fe, напротив, в торфе выше, что связано с закреплением в верхних горизонтах торфяных почв окисных форм железа. Верховым сфагновым малоразложившимся торфам со степенью разложения менее 5% обычно свойственна низкая подвижность Fe ([Архипов и др., 1997](#)).

Различия в составе растений дают основания для предположения о закономерных различиях в составе торфа, сформировав-

шегося в разных ландшафтных условиях: 1) на относительно повышенных участках, где развиты торфяно-подзолы и сухоторфяные почвы, и 2) на плоских недренированных водоразделах с плоскобугристыми болотами, где доминируют олиготрофные торфяные почвы. Проведенные подсчеты показали, что в торфе олиготрофных болот, сложенном преимущественно сфагновыми мхами, выше содержание S, As, Zn, Cu, Sr, Hg, Cd – халькофильных элементов, отличающихся интенсивным биологическим накоплением, а также Ca – главного металла живого вещества и близкого к нему по геохимическим свойствам Sr. В торфе почв, развитых под кустарничково-моховыми тундровыми сообществами и листовничными редколесьями, существенно выше концентрации Al, Si, Ti, Zr – элементов, входящих в состав стойких к разрушению минералов, что свидетельствует о поступлении почвенного мелкозема в торфяные горизонты в результате процессов дефляции, широко распространенных в тундрах Ямала, Гыдана и Тазовского полуострова ([Ермохина, 2008](#)). Обогащенность торфов в тундровой зоне иловатыми и пылеватыми частицами была описана многими авторами ([Игнатенко, Друзин, 1972](#); [Васильевская, 1980](#)). Зольность торфяного слоя в верхней части почвенного профиля в субарктической тундре может достигать до 28% ([Дедков, 1995](#)). Таким образом, поступление мелкозема в торф сильнее выражено на водоразделах с господством кустарничково-мохово-лишайниковых тундр, чем в олиготрофных болотных комплексах. В.В. Добровольским ([2003](#)) отмечалось, что максимальное содержание минеральной примеси в торфах характерно для равнинных дренированных участков, по которым происходит сток талых вод, что подтверждается нашими исследованиями.

Проведенный анализ достоверности различий средних значений с использованием критерия Манна – Уитни показал, что элементный состав олиготрофного болотного торфа достоверно отличается от торфа, сформировавшегося под тундровыми сообществами и редколесьями (табл. 5).

Таблица 5. Элементный состав торфа водораздельных кустарничково-мохово-лишайниковых тундр и олиготрофного сфагнового торфа верховых болот

Table 5. An elemental composition of peat of dwarf shrub-lichen-moss tundras and ombrotrophic bogs

Показатели	Сухоторфяные горизонты (n = 9)		Сфагновый торф олиготрофных болот (n = 8)		Значения критерия Манна-Уитни	Уровень значимости <i>p</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>		
Na ₂ O, %	0.61	0.16	0.52	0.07	20	-
MgO, %	0.24	0.36	0.07	0.13	20	-
Al ₂ O ₃ , %	6.08	3.51	0.95	0.67	10	0.01
SiO ₂ , %	32.3	23.9	5.29	6.64	14	0.05
P ₂ O ₅ , %	0.80	0.59	0.45	0.20	22	-
S, %	0.34	0.22	0.39	0.11	25	-
K ₂ O, %	0.76	0.83	0.03	0.06	18	0.05
CaO, %	1.30	1.54	3.24	1.77	12.5	0.05
TiO ₂ , %	0.47	0.34	0.13	0.07	11	0.05
MnO, %	0.027	0.03	0.022	0.02	31	-
Fe ₂ O ₃ , %	3.94	1.33	3.16	0.73	13	0.05
V, мг/кг	66.2	26.1	15.8	7.9	8	0.01
Cr, мг/кг	58.0	27.1	18.5	6.3	9	0.01
Co, мг/кг	30.0	15.6	32.2	4.1	26	-
Ni, мг/кг	42.5	19.3	34.3	6.6	31	-
Cu, мг/кг	34.9	26.8	47.9	8.1	19	-
Zn, мг/кг	51.7	14.1	68.9	16.4	16	0.05
As, мг/кг	16.8	20.3	20.8	19.2	21	-
Sr, мг/кг	235.5	66.1	344.0	45.3	9	0.01
Pb, мг/кг	11.6	7.1	8.8	5.2	21	-
Rb, мг/кг	207.9	187.9	445.9	169.8	10	0.01
Ba, мг/кг	327.2	134.0	187.1	42.2	10	0.01
Zr, мг/кг	125.6	144.9	0.27	9.18	8	0.01
Nb, мг/кг	50.9	44.1	99.9	38.1	12	0.05
Cs, мг/кг	4.4	1.5	3.69	0.76	25	-
Ga, мг/кг	23.3	13.9	44.9	14.5	8	0.01
Ce, мг/кг	50.7	15.2	31.2	13.4	14	0.05
La, мг/кг	19.5	10.9	0.57	0.99	5	0.01
Sc, мг/кг	7.19	4.27	3.79	3.24	17	-
Y, мг/кг	14.5	6.3	3.13	2.87	8	0.01
Yb, мг/кг	1.52	1.40	0.26	0.07	8	0.01
Mo, мг/кг	2.02	0.32	1.62	0.21	10	0.05
Sn, мг/кг	1.25	3.53	0.00	0.00	-	-
Cd, мг/кг	0.39	0.11	0.47	0.15	23	-
Hg, мг/кг	0.22	0.17	0.46	0.16	8	0.01

На формирование состава торфа оказывают определяющее влияние процессы биологического накопления растениями-доминантами, особенности водомиграционной активности элементов в болотных водах, поступление почвенного мелкозема и аэрозолей воздушным путем.

Различия состава олиготрофного сфагнового торфа болот и торфа кустарничково-моховых тундр и редколесий необходимо учитывать при проведении мониторинга поступления тяжелых металлов.

ВЫВОДЫ

1. В почвах Пур-Тазовского междуречья среднее содержание экологически опасных тяжелых металлов меньше кларка земной коры (Cu, Pb, Zn, Ni, Sr), либо на уровне кларка (Hg, Co). Повышенные концентрации свойственны малоподвижным элементам (Zr, Mo, Sn). Полученные результаты в целом подтверждают низкое содержание микроэлементов в почвах севера Западной Сибири, однако по сравнению с сопредельными участками, в Пур-Тазовском междуречье почвы содержат больше Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, Co, Cd, что связано с минералогическим и гранулометрическим составом почвообразующих пород (аллювиально-морских отложений), которые характеризуются более высокими концентрациями элементов по сравнению с озерно-аллювиальными отложениями.

2. В вертикальном профиле почв заметны различия элементного состава органических и минеральных горизонтов по содержанию халькофильных элементов (S, P, Hg, Zn, Cu). Выявлена корреляционная зависимость между содержанием органического вещества в почвах и концентрацией S, Hg, Ga, Sr, Cu, As, Cd. Накопление этих элементов на биогеохимическом барьере детритогенеза определяет вертикальную геохимическую структуру почв.

3. Слоевища напочвенных лишайников характеризуются крайне низким содержанием элементов, существенно уступая в этом отношении сфагновым мхам, состав которых зависит от болотных вод со свойственной им повышенной концентрацией многих элементов, подвижных в кислой среде.

4. Отмечены различия состава олиготрофного торфа болотных почв и поверхностных органогенных горизонтов почв, развитых под редколестями и тундровыми сообществами (торфяно-подзолов, сухоторфяных почв). В олиготрофном торфе болотных почв, сформированном сфагновыми мхами, выше содержание халькофильных элементов, активно мигрирующих в кислых водах (Zn, Cu, As, Cd, Hg). В органогенных горизонтах почв дренированных участков выше концентрации элементов-литофилов: Al, Si, Ti, Zr, – поступающих в результате дефляции и смыва частиц талыми водами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Азбалин Е.В., Шинкарук Е.В.* Уровень химического загрязнения почвы в долине реки Лукыха Тазовского полуострова // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2015. № 4 (89). С. 42–48.
2. *Алексеев И.И., Динкелакер Н.В., Орипова А.А., Семьина Г.А., Морозов А.А., Абакумов Е.В.* Оценка экотоксикологического состояния почв полярного Урала и южного Ямала // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96. № 10. С. 941–945. DOI: [10.18821/0016-9900-2017-96-10-941-945](https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-10-941-945).
3. *Архипов В.С., Бернатонис В.К., Резчиков В.И.* Железо в торфах центральной части Западной Сибири // Почвоведение. 1997. № 3. С. 345–351.
4. *Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа.* ФГУП Омская картографическая фабрика, 2004. 303 с.
5. *Башкин В.Н.* Биогеохимические циклы в тундровых экосистемах импактных зон газовой индустрии // Геохимия. 2017. № 10. С. 954–966. DOI: [10.7868/S0016752517100028](https://doi.org/10.7868/S0016752517100028).
6. *Василевич Р.С.* Макро- и микроэлементный состав мерзлотных бугристых торфяников лесотундры европейского северо-востока России // Геохимия. 2018. № 12. С. 1158–1172. DOI: [10.1134/S0016752518100126](https://doi.org/10.1134/S0016752518100126).
7. *Васильевская В.Д.* Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: Наука, 1980. 236 с.
8. *Васильевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г.* Почвы севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 286 с.
9. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород Земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

10. Вишнева Ю.С., Попова Л.Ф. Оценка экологического состояния и степени загрязнения тяжелыми металлами почв Арктики // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. 2016. № 2. С. 96–104.
11. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
12. Дедков В.С. Почвенный покров водоразделов / Природа Ямала. Екатеринбург: УИФ Наука, 1995. С. 109–121.
13. Добровольский В.В. Основные черты геохимии арктического почвообразования // Почвоведение. 1994. № 6. С. 85–93.
14. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с.
15. Ермохина К.А. Фитоиндикация стадий развевания песчаных отложений водоразделов в типичных тундрах Ямала // Проблемы региональной экологии. М.: Камертон, 2008. Вып. 6. С. 78–84.
16. Игнатенко И.В., Друзин А.В. Физико-химическая характеристика почв лесотундрового стационара. Почвы и растительность восточноевропейской лесотундры (ред. Б.Н. Норин). Л.: Наука, 1972. С. 30–63.
17. Калинин П.И., Кудреватых И.Ю., Ваганов И.М., Борисов А.В., Алексеев А.О. Биогеохимические процессы в степных ландшафтах Ергенинской возвышенности в голоцене // Почвоведение. 2018. № 5. С. 526–537.
18. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Изд-во Ойкумена, 2004. 342 с.
19. Межибор А.М., Большунова Т.С. Биогеохимическая характеристика сфагновых мхов и эпифитных лишайников в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 1. С. 205–213.
20. Моисеенко Т.И., Гашев С.Н. Биогеохимическая индикация загрязнения металлами и радионуклидами в регионах нефтедобычи // Доклады Академии Наук, 2012. Т. 447. № 5. С. 557–560. DOI: [10.1134/S10283334X12120112](https://doi.org/10.1134/S10283334X12120112).
21. Московченко Д.В., Моисеева И.Н., Хозяинова Н.В. Элементный состав растений Уренгойских тундр // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2012. № 12. С. 130–136.
22. Московченко Д.В. Экогеохимия нефтедобывающих районов Западной Сибири. Новосибирск: Академ. изд-во “ГЕО”, 2013. 260 с.
23. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Арестова И.Ю. Оценка трансформации природной среды в районах разработки углеводородного сырья на севере Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2018. Т. 25. № 1. С. 122–138. DOI: [10.15372/SEJ20180111](https://doi.org/10.15372/SEJ20180111).

24. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г.* Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. DOI: [10.1134/S0032180X19020114](https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114).
25. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
26. *Пятницкая Г.Р., Радчикова А.М., Скоробогатов В.А., Рыбальченко В.В.* Перспективы газонефтеносности восточных районов Пур-Тазовской области Западной Сибири // Научно-технический сборник “Вести газовой науки”. 2010. № 2 (5). С. 12–21.
27. *Сорокина Е.П., Дмитриева Н.К., Карнов Л.К., Масленников В.В.* Анализ регионального геохимического фона как основа эколого-геохимического картирования равнинных территорий: на примере северной части Западно-Сибирского региона // Прикладная геохимия. Вып. 2. Экологическая геохимия. М.: Изд-во ИМГРЭ, 2001. С. 316–338.
28. *Сысо А.И.* Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 275 с.
29. *Таргульян В.О.* Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. М.: Наука, 1971. 268 с.
30. *Томашунас В.М., Абакумов Е.В.* Содержание тяжелых металлов в почвах полуострова Ямал и острова Белый // Гигиена и санитария. 2014. № 6. С. 26–31.
31. *Хренов В.Я.* Содержание микроэлементов в почвообразующих породах Севера Тюменской области // Геогр. и прир. рес. 1987. № 3. С. 163–165.
32. *Abakumov E., Shamilishvili G., Yurtaev A.* Soil polychemical contamination on Belyi Island as key background and reference plot for Yamal region // Polish Polar Research. 2017. Vol. 38(3). P. 313–332. DOI: [10.1515/popore-2017-0020](https://doi.org/10.1515/popore-2017-0020).
33. *Alekseev I., Shamilishvili G., Abakumov E.* Ecotoxicological State of urban soils of the Arctic with different functional Load (Yamal autonomous region). In: Vasenev V., Dovletyarova E., Cheng Z., Prokof'eva T., Morel J., Ananyeva N. (eds). Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services. SUITMA 2017. Springer Geography. 2019. P. 206–211. DOI: [10.1007/978-3-319-89602-1_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1_25).
34. *Ávila-Pérez P., Longoria-Gándara L.C., García-Rosales G. et al.* Monitoring of elements in mosses by instrumental neutron activation analysis and total X-ray fluorescence spectrometry // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2018. Vol. 317(1). P. 367–380. DOI: [10.1007/s10967-018-5896-z](https://doi.org/10.1007/s10967-018-5896-z).
35. *Antcibor I., Eschenbach A., Zubrzycki S., Kutzbac L., Bolshiyarov D., Pfeiffer E.M.* Trace metal distribution in pristine permafrost-affected soils of

- the Lena River delta and its hinterland, northern Siberia, Russia // *Biogeosciences*. 2014. No. 11. P. 1–15. DOI: [10.5194/bg-11-1-201](https://doi.org/10.5194/bg-11-1-201).
36. *Basiliko N., Yavitt J.B.* Influence of Ni, Co, Fe, and Na additions on methane production in Sphagnum-dominated Northern American peatlands // *Biogeochemistry*. 2001. Vol. 52. P. 133–153. DOI: [10.1023/A:1006461803585](https://doi.org/10.1023/A:1006461803585).
37. *Efremova T.T., Efremov S.P., Koutzenogii K.P., Peresedov V.F.* Biogeochemical migration of calcophylic elements in the conditions of a deep-seated marsh in West Siberia // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1999. Vol. 241(2). P. 355–360. DOI: [10.1007/BF02347475](https://doi.org/10.1007/BF02347475).
38. *Gulińska J., Rachlewicz G., Szczuciński W., Baralkiewicz D., Kózka M., Bulska E., Burzyk M.* Soil contamination in High Arctic areas of human impact, central Spitsbergen, Svalbard // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2003. Vol. 12(6). P. 701–707.
39. *Halbach K., Mikkelsen Ø., Berg T., Steinnes E.* The presence of mercury and other trace metals in surface soils in the Norwegian Arctic // *Chemosphere*. 2017. Vol. 188. P. 567–574. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2017.09.012](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.012).
40. *Hanaka A., Plak A., Zagórski P., Ozimek E., Rysiak A., Majewska M., Jaroszek-Ścisiel J.* Relationships between the properties of Spitsbergen soil, number and biodiversity of rhizosphere microorganisms, and heavy metal concentration in selected plant species // *Plant and Soil*. 2019. Vol. 436 (1–2). P. 49–69. DOI: [10.1007/s11104-018-3871-7](https://doi.org/10.1007/s11104-018-3871-7).
41. *IUSS Working Group WRB*. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
42. *Ji X., Abakumov E., Antcibor I., Tomashunas V., Knoblauch C., Zubzycki S., Pfeiffer E.M.* Influence of anthropogenic activities on metals in arctic permafrost: a characterization of benchmark soils on the Yamal and Gydan peninsulas in Russia // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019a. Vol. 76(4). P. 540–553. DOI: [10.1007/s00244-019-00607-y](https://doi.org/10.1007/s00244-019-00607-y).
43. *Ji X., Abakumov E., Polyakov V.* Assessments of pollution status and human health risk of heavy metals in permafrost-affected soils and lichens: A case-study in Yamal Peninsula, Russia Arctic // *Human and Ecological Risk Assessment*. 2019b. Vol. 25(8). P. 2142–2159. DOI: [10.1080/10807039.2018.1490887](https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1490887).
44. *Krajcarova L., Novotny K., Chattova B., Elser J.* Elemental analysis of soils and *Salix polaris* in the town of Pyramiden and its surroundings

- (Svalbard) // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 10124–10137. DOI: [10.1007/s11356-016-6213-4](https://doi.org/10.1007/s11356-016-6213-4).
45. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. 4th ed. CRC Press, 2011. 534 p.
46. *Lozano R., Bernal J.P.* Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis // *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 2005. Vol. 22(3). P. 329–344.
47. *Moskovchenko D.V., Kurchatova A.N., Fefilov N.N., Yurtaev A.A.* Concentrations of trace elements and iron in the Arctic soils of Belyi Island (the Kara Sea, Russia): patterns of variation across landscapes // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017. Vol. 189:210. DOI: [10.1007/s10661-017-5928-0](https://doi.org/10.1007/s10661-017-5928-0).
48. *Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. Vol. 299. P. 715–717. DOI: [10.1038/299715a0](https://doi.org/10.1038/299715a0).
49. *Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S.* Permafrost thaw and climate warming may decrease the CO₂, carbon, and metal concentration in peat soil waters of the Western Siberia Lowland // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 634(1). P. 1004–1023. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.04.059](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.059).
50. *Rogan G., Tighe M., Grave P. et al.* Optimization of portable X-ray fluorescence spectrometry for the assessment of soil total copper concentrations: application at an ancient smelting site // *J. Soils Sediments*. 2019. Vol. 19 (2). P. 830–839. DOI: [10.1007/s11368-018-2091-3](https://doi.org/10.1007/s11368-018-2091-3).
51. *Wojtuń B., Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kempers A.J., Skrzypek G.* Metals in some dominant vascular plants, mosses, lichens, algae, and the biological soil crust in various types of terrestrial tundra, SW Spitsbergen, Norway // *Polar Biology*. 2013. Vol. 36 (12). P. 1799–1809. DOI: [10.1007/s00300-013-1399-0](https://doi.org/10.1007/s00300-013-1399-0).

REFERENCES

1. Agbalyan E.V., Shinkaruk E.V., Uroven' khimicheskogo zagryazneniya pochvy v doline reki Lukyyakha Tazovskogo poluostrova (The level of chemical pollution of the soil in the valley of the river Lukiyakha of the Taz Peninsula), *Nauchnyj vestnik Jamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga*, 2015, No. 4 (89), pp. 42–48.
2. Alekseev I.I., Dinkelaker N.V., Oripova A.A., Sem'ina G.A., Morozov A.A., Abakumov E.V., Otsenka ekotoksikologicheskogo sostoyaniya pochv polyarnogo Urala i yuzhnogo Yamala (Assessment of ecotoxicological state of

- soils of the polar Urals and southern Yamal), *Gigiena i sanitarija*, 2017, Vol. 96, No. 10, pp. 941–945, DOI: [10.18821/0016-9900-2017-96-10-941-945](https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-10-941-945).
3. Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Rezhnikov V.I., Zhelezo v torfakh tsentral'noi chasti Zapadnoi Sibiri (Iron in peat in the central part of Western Siberia), *Pochvovedenie*, 1997, No. 3, pp. 345–351.
4. *Atlas Jamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga* (Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous district), Omsk: FGUP Omskaja kartografiche-skaja fabrika, 2004, 303 p.
5. Bashkin V.N., Biogeokhimicheskie tsikly v tundrovyykh ekosistemakh impaktnyykh zon gazovoi industrii (Biogeochemical cycles in tundra ecosystems in areas impacted by gas industry facilities), *Geohimija*, 2017, No. 10, pp. 954–966, DOI: [10.7868/S0016752517100028](https://doi.org/10.7868/S0016752517100028).
6. Vasilevich R.S., Makro- i mikroelementnyi sostav merzlotnykh bugristykh torfyanikov lesotundry evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Major and trace element compositions of hummocky frozen peatlands in the forest–tundra of northeastern European Russia), *Geohimija*, 2018, No. 12, pp. 1158–1172. DOI: [10.1134/S0016752518100126](https://doi.org/10.1134/S0016752518100126).
7. Vasil'evskaja V.D., *Pochvoobrazovanie v tundrah Srednej Sibiri* (Soil formation in the tundra of Central Siberia), Moscow: Nauka, 1980, 236 p.
8. Vasil'evskaja V.D., Ivanov V.V., Bogatyrev L.G., *Pochvy severa Zapadnoj Sibiri* (Soils of the north of Western Siberia), Moscow: Izd-vo MGU, 1986, 286 p.
9. Vinogradov A.P., Srednee sodержanie khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhenykh gornykh porod Zemnoi kory (The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust), *Geohimija*, 1962, No. 7, pp. 555–571.
10. Vishnevaya Yu.S., Popova L.F., Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i stepeni zagryazneniya tyazhelymi metallami pochv Arktiki (Assessment of the ecological status and degree of contamination by heavy metals in the soils of the Arctic), *Vestnik MGOU, Serija Estestvennye nauki*, 2016, No. 2, pp. 96–104.
11. Glazovskaja M.A., *Geohimija prirodnykh i tehnogennykh landshaftov SSSR* (Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR), Moscow: Vysshaja shkola, 1988, 328 p.
12. Dedkov V.S., Pochvennyj pokrov vodorazdelov (Soil cover of watersheds). In: *Priroda Jamala*. (The nature of Yamal Peninsula), Ekaterinburg: Nauka, 1995, pp. 109–121.
13. Dobrovolskij V.V., Osnovnye cherty geohimii arkticheskogo pochvoobrazovaniya (The main features of the geochemistry of the Arctic soil formation), *Pochvovedenie*, 1994, No. 6, pp. 85–93.

14. Dobrovol'skij V.V., *Osnovy biogehimii* (Fundamentals of biogeochemistry), Moscow: Akademiya, 2003, 400 p.
15. Ermokhina K.A., Fitoindikatsiya stadii razvevaniya peschanykh otlozhenii vodorazdelov v tipichnykh tundrach Yamala (Phytoindication of the stages of dispersal of sandy deposits of watersheds in typical tundra of the Yamal peninsula), *Problemy regional'noi ekologii*, 2008, No. 6, pp. 78–84.
16. Ignatenko I.V., Druzin A.V., Fiziko-himicheskaja karakteristika pochv lesotundrovogo stacionara (Physico-chemical characteristics of the soils of the forest-tundra hospital, In: *Pochvy i rastitel'nost' vostochnoevropejskoj lesotundry* (Soils and vegetation of the East European forest-tundra, Ed. B.N. Norin), Leningrad: Nauka, 1972, pp. 30–63.
17. Kalinin P.I., Kudrevatykh I.Yu., Vagapov I.M., Borisov A.V., Alekseev A.O., Biogekhimicheskie protsessy v stepnykh landshaftakh Ergeninskoj vozvyshechnosti v golotsene (Biogeochemical processes in steppe landscapes of the Ergeni upland in the Holocene), *Pochvovedenie*, 2018, No. 5, pp. 526–537.
18. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnosis of soils of Russia), Smolensk: Oykumena, 2004, 342 p.
19. Mezhibor A.M., Bolshunova T.S., Biogeochemistry of sphagnum moss and epiphytic lichens in oil and gas exploration areas of Tomsk region, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, Vol. 325, No. 1, pp. 205–213.
20. Moiseenko T.I., Gashev S.N., Biogekhimicheskaya indikatsiya zagryazneniya metallami i radionuklidami v regionakh neftedobychi (Biogeochemical indication of pollution with metals and radionuclides in oil-producing regions), *Doklady Akademii Nauk*, 2012, Vol. 447, No. 5, pp. 557–560, DOI: [10.1134/S1028334X12120112](https://doi.org/10.1134/S1028334X12120112).
21. Moskovchenko D.V., Moiseeva I.N., Khozyainova N.V., Elementnyi sostav rastenii Urengoisikikh tundr (Elemental composition of plants of the Urengoy tundra), *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*, 2012, No. 12, pp. 130–136.
22. Moskovchenko D.V., Ekogekhimiya neftedobyvayushchikh raionov Zapadnoi Sibiri (Ecogeochemistry of oil-producing regions of Western Siberia), Novosibirsk: "GEO", 2013, 260 p.
23. Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S. Yu., Arestova I.Yu., Otsenka transformatsii prirodnoi sredy v raionakh razrabotki uglevodorodnogo syr'ya na severe Zapadnoi Sibiri (Evaluation of environmental transformation in areas of hydrocarbon deposits in the north of Western Siberia), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2018, Vol. 25, No. 1, pp. 122–138, DOI: [10.15372/SEJ20180111](https://doi.org/10.15372/SEJ20180111).

24. Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G., Fonovoe sodержanie khimicheskikh elementov v pochvakh i donnykh osadkakh severa Zapadnoi Sibiri (Background content of chemical elements in soils and bottom sediments of the North of Western Siberia), *Pochvovedenie*, 2019, No. 4, pp. 422–439, DOI: [10.1134/S0032180X19020114](https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114).
25. Perel'man A.I., *Geohimija* (Geochemistry), Moscow: Vysshaja shkola, 1989, 528 p.
26. Pyatnitskaya G.R., Radchikova A.M., Skorobogatov V.A., Rybal'chenko V.V., Perspektivy gazoneftenosnosti vostochnykh raionov Pur-Tazovskoi oblasti Zapadnoi Sibiri (Prospects for gas and oil potential of the eastern regions of Pur-Taz region of Western Siberia), *Vesti gazovoj nauki*, 2010, No. 2 (5), pp. 12–21.
27. Sorokina E.P., Dmitrieva N.K., Karpov L.K., Maslennikov V.V., *Analiz regional'nogo geokhimicheskogo fona kak osnova ekologo-geokhimicheskogo kartirovaniya ravninnykh territorii: na primere severnoi chasti Zapadno-Sibirskogo regiona* (Analysis of the regional geochemical background as the basis for ecological and geochemical mapping of lowland territories: on the example of the Northern part of the West Siberian region), *Prikladnaja geohimija. Ekologicheskaya geokhimiya*, 2001, No. 2, pp. 316–338.
28. Syso A.I., *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoi Sibiri* (Patterns of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia), Novosibirsk: Publishing House of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 275 p.
29. Targul'yan V.O., *Pochvoobrazovanie i vyvetrивание v kholodnykh gumidnykh oblastiakh* (Soil formation and weathering in cold humid areas), Moscow: Nauka, 1971, 268 p.
30. Tomashunas V.M., Abakumov E.V., Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochvakh poluostrova Yamal i ostrova Belyi (The content of heavy metals in soils of the Yamal Peninsula and the Bely Island), *Gigiena i sanitarija*, 2014, No. 6, pp. 26–31.
31. Khrenov V.Ya., Soderzhanie mikroelementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh Severa Tyumenskoi oblasti (Content of trace elements in soil-forming rocks of the North of the Tyumen region), *Geogr. i prir. res*, 1987, No. 3, pp. 163–165.
32. Abakumov E., Shamilishviliy G., Yurtaev A., Soil polychemical contamination on Belyi Island as key background and reference plot for Yamal region, *Polish Polar Research*, 2017, Vol. 38(3), pp. 313–332, DOI: [10.1515/popore-2017-0020](https://doi.org/10.1515/popore-2017-0020).
33. Alekseev I., Shamilishvili G., Abakumov E., Ecotoxicological State of urban soils of the Arctic with different functional Load (Yamal autonomous

- region), In: Vasenev V., Dovletyarova E., Cheng Z., Prokof'eva T., Morel J., Ananyeva N. (Eds), *Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services*, SUITMA 2017, Springer Geography, 2019, pp. 206–211, DOI: [10.1007/978-3-319-89602-1_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1_25).
34. Ávila-Pérez P., Longoria-Gándara L.C., García-Rosales G. et al., Monitoring of elements in mosses by instrumental neutron activation analysis and total X-ray fluorescence spectrometry, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, 2018, Vol. 317(1), pp. 367–380, DOI: [10.1007/s10967-018-5896-z](https://doi.org/10.1007/s10967-018-5896-z).
35. Antcibor I., Eschenbach A., Zubrzycki S., Kutzbac L., Bolshiyarov D., Pfeiffer E.M., Trace metal distribution in pristine permafrost-affected soils of the Lena River delta and its hinterland, northern Siberia, Russia, *Biogeosciences*, 2014, No. 11, pp. 1–15, DOI: [10.5194/bg-11-1-201](https://doi.org/10.5194/bg-11-1-201).
36. Basiliko N., Yavitt J.B., Influence of Ni, Co, Fe, and Na additions on methane production in Sphagnum-dominated Northern American peatlands, *Biogeochemistry*, 2001, Vol. 52, pp. 133–153, DOI: [10.1023/A:1006461803585](https://doi.org/10.1023/A:1006461803585).
37. Efremova T.T., Efremov S.P., Koutzenogii K.P., Peresedov V.F., Biogeochemical migration of calcophylic elements in the conditions of a deep-seated marsh in West Siberia, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1999, Vol. 241(2), pp. 355–360, DOI: [10.1007/BF02347475](https://doi.org/10.1007/BF02347475).
38. Gulińska J., Rachlewicz G., Szczuciński W., Baralkiewicz D., Kózka M., Bulska E., Burzyk M., Soil contamination in High Arctic areas of human impact, central Spitsbergen, Svalbard, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2003, Vol. 12(6), pp. 701–707.
39. Halbach K., Mikkelsen Ø., Berg T., Steinnes E., The presence of mercury and other trace metals in surface soils in the Norwegian Arctic, *Chemosphere*, 2017, Vol. 188, pp. 567–574, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2017.09.012](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.012).
40. Hanaka A., Plak A., Zagórski P., Ozimek E., Rysiak A., Majewska M., Jaroszk-Ścisiel J., Relationships between the properties of Spitsbergen soil, number and biodiversity of rhizosphere microorganisms, and heavy metal concentration in selected plant species, *Plant and Soil*, 2019, Vol. 436(1–2), pp. 49–6, DOI: [10.1007/s11104-018-3871-7](https://doi.org/10.1007/s11104-018-3871-7).
41. *IUSS Working Group WRB*. 2014, World Reference Base for Soil Resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports, No. 106, FAO, Rome.
42. Ji X., Abakumov E., Antcibor I., Tomashunas V., Knoblauch C., Zubrzycki S., Pfeiffer E.M., Influence of anthropogenic activities on metals in arctic permafrost: a characterization of benchmark soils on the Yamal and Gydan peninsulas in Russia, *Archives of Environmental Contamination and*

Toxicology, 2019a, Vol. 76(4), pp. 540–553, DOI: [10.1007/s00244-019-00607-y](https://doi.org/10.1007/s00244-019-00607-y).

43. Ji X., Abakumov E., Polyakov V., Assessments of pollution status and human health risk of heavy metals in permafrost-affected soils and lichens: A case-study in Yamal Peninsula, Russia Arctic, *Human and Ecological Risk Assessment*, 2019b, Vol. 25 (8), pp. 2142–2159, DOI: [10.1080/10807039.2018.1490887](https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1490887).

44. Krajcarova L., Novotny K., Chattova B., Elser J., Elemental analysis of soils and *Salix polaris* in the town of Pyramiden and its surroundings (Svalbard), *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, Vol. 23, pp. 10124–10137, DOI: [10.1007/s11356-016-6213-4](https://doi.org/10.1007/s11356-016-6213-4).

45. Kabata-Pendias A., *Trace elements in soils and plants*, CRC Press, 2011, 534 p.

46. Lozano R., Bernal J.P., Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2005, Vol. 22 (3), pp. 329–344.

47. Moskovchenko D.V., Kurchatova A.N., Fefilov N.N., Yurtaev A.A., Concentrations of trace elements and iron in the Arctic soils of Belyi Island (the Kara Sea, Russia): patterns of variation across landscapes, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, Vol. 189:210, DOI: [10.1007/s10661-017-5928-0](https://doi.org/10.1007/s10661-017-5928-0).

48. Nesbitt H.W., Young G.M., Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, *Nature*, 1982, Vol. 299, pp. 715–717, DOI: [10.1038/299715a0](https://doi.org/10.1038/299715a0).

49. Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A., Manasyrov R.M., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S., Permafrost thaw and climate warming may decrease the CO₂, carbon, and metal concentration in peat soil waters of the Western Siberia Lowland, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 634 (1), pp. 1004–1023, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.04.059](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.059).

50. Rogan, G., Tighe, M., Grave, P. et al., Optimization of portable X-ray fluorescence spectrometry for the assessment of soil total copper concentrations: application at an ancient smelting site, *J. Soils Sediments*, 2019, Vol. 19 (2), pp. 830–839, DOI: [10.1007/s11368-018-2091-3](https://doi.org/10.1007/s11368-018-2091-3).

51. Wojtuń B., Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kempers A. J., Skrzypek G., Metals in some dominant vascular plants, mosses, lichens, algae, and the biological soil crust in various types of terrestrial tundra, SW Spitsbergen, Norway, *Polar Biology*, 2013, Vol. 36 (12), pp. 1799–1809, DOI: [10.1007/s00300-013-1399-0](https://doi.org/10.1007/s00300-013-1399-0).