

УДК 631.423.4

СОДЕРЖАНИЕ И ПОДВИЖНОСТЬ МЕТАЛЛОВ В ОЛИГОТРОФНЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2023 г. Д. А. Соколов^{a, b, *}, И. С. Иванова^b, Т. И. Сиромля^a^aИнститут почвоведения и агрохимии СО РАН,
пр-т Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090 Россия^bТомский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
пр-т Академический, 4, Томск, 634055 Россия

*e-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 26.04.2023 г.

После доработки 27.07.2023 г.

Принята к публикации 29.07.2023 г.

Происходящие климатические изменения оказывают наибольшее влияние на природные экосистемы северных широт, поскольку потепление климата, а также возрастающая антропогенная нагрузка, связанная с освоением арктических территорий, способствуют деградации мерзлых торфов и увеличению мощности сезонного-талого слоя почв. Актуальность исследования торфяных олиготрофных почв (Cryic Histosols) северных территорий Западной Сибири связана с тем, что их деградация обогащает природные воды органо-минеральными веществами, содержащими большой набор химических элементов, в том числе тяжелые металлы, способствуя изменению гидрогеохимического облика природных вод Севера. Описаны основные свойства торфов, отобранных из разных горизонтов почвенных профилей, заложенных на ключевых участках, охватывающих территорию ЯНАО с севера на юг и с запада на восток. Химический состав почв определяли в ИПА СО РАН стандартными методами. Содержания валовых и подвижных форм металлов (Fe, Ca, K, Na, Mg, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) исследовали методом оптической атомно-эмиссионной спектроскопии и пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии соответственно. Установлено, что характерной особенностью распределения концентраций исследуемых химических элементов в торфяных олиготрофных почвах северной части Западной Сибири является наличие двух максимумов в пределах почвенного профиля. Первый приурочен к верхним горизонтам, имеющим признаки деградации, второй — к верхней части многолетнемерзлых пород. Статистический анализ с использованием метода главных компонент показал, что низкая зольность, pH и широкое отношение C/N связаны с высокой подвижностью K, Cu, Zn и Mg. С увеличением зольности, pH и $N_{\text{общ}}$ в верхней части многолетнемерзлых органогенных пород повышается подвижность Fe, Mn, Pb, Cd и Cr.

Ключевые слова: торф, Арктика, макро- и микроэлементы, тяжелые металлы, подвижность элементов в почвах, миграция, Cryic Histosols, многолетняя мерзлота, остаточная эутрофность

DOI: 10.31857/S0032180X23600786, **EDN:** YWLLN

ВВЕДЕНИЕ

Формирование олиготрофных торфяных почв происходит в условиях преимущественно атмосферной аккумуляции минеральных веществ. Их отличительной особенностью является наличие мощных торфяных горизонтов, характеризующихся низкой степенью разложения растительных остатков. Низкая плотность и высокая влагоемкость торфяных почв, при большой площади болотных массивов, обуславливают их ведущую роль в формировании геохимического облика поверхностных вод ряда регионов России. Особенно это актуально для севера Западной Сибири,

где торфяные олиготрофные почвы преобладают в составе почвенного покрова [34]. Олиготрофные почвы характеризуются низким содержанием зольных элементов. При этом они считаются обогащенными металлами по причине их высокой концентрации в золе [7]. Торфяные почвы характеризуются высоким содержанием органических веществ, а также высокой кислотностью, способствующей увеличению подвижности химических элементов (ХЭ) [18], способных оказывать влияние на состав поверхностных вод [40].

Данные свойства обусловлены как природными, так и антропогенными факторами. С одной

стороны, наблюдающиеся сегодня климатические изменения, которые наиболее ярко прослеживаются в северных широтах Сибири, способствуют отоплению и деградации многолетнемерзлых пород [44, 56]. В свою очередь, увеличение мощности сезонно-талого слоя почв может привести к высвобождению из мерзлых горизонтов органического вещества и ХЭ, в том числе тяжелых металлов [12, 42, 48, 53]. С другой стороны, на севере Западной Сибири сосредоточены огромные запасы углеводородного сырья, активная добыча которых способствует развитию как производственной, так и социальной инфраструктуры (трубопроводы, автомобильные дороги, линии электропередачи и т.д.). Увеличивающаяся с каждым годом антропогенная нагрузка, вызванная интенсивным освоением арктических территорий Западной Сибири оказывает влияние на все компоненты окружающей среды, в том числе на почвенный покров и природные воды, где нефть (в том числе нефтепродукты — фенолы, полиароматические соединения) является одним из основных загрязнителей, поступление которых происходит при аварийных разливах из трубопроводов [2, 4, 9]. Также к основным поллютантам, характерным для торфяных почв нефтегазодобывающих территорий Западной Сибири, относят металлы V, Ba, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr, Zn, входящие в состав самой нефти, а также сопутствующих ей пластовых вод и используемых при бурении растворов [5, 21].

В последнее время поведению ХЭ в компонентах ландшафтов высоких широт Сибири уделяют большое внимание [36, 44, 45, 47, 56]. Несмотря на это, можно отметить, что оценка элементного химического состава торфов проводится по валовым концентрациям элементов, в то время как подвижным формам металлов и их поведению уделяется мало внимания. Кроме того, основная часть проводимых исследований направлена на изучение элементного химического состава торфяных почв в широтном или внутриландшафтном градиентах, а работ, посвященных меридиональным особенностям, т.е. выявлению специфики элементного состава почв отдельных регионов, в настоящее время недостаточно.

Цель исследования — изучение содержания и поведения некоторых металлов в торфяных олиготрофных почвах северных территорий Западной Сибири, не подверженных антропогенному воздействию. Актуальность данного исследования обусловлена тем, что почвы способны не только аккумулировать тяжелые металлы, характеризующиеся интенсивной биогенной и водной миграцией и оказывающие влияние на живые организмы [3, 24], но и сами могут являться их дополнительным источником в условиях деградации мерзлоты.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследований выбраны торфяные олиготрофные почвы, сформированные на приозерных участках плоских водоразделов Ямало-Ненецкого автономного округа. Исследуемая часть региона относится к субарктическому поясу и характеризуется спорадическим распространением многолетней мерзлоты [11]. Литогенной основой ландшафта северных территорий Западной Сибири являются морские, современные озерные, озерно-болотные, болотные и аллювиальные отложения [10], представленные, в основном, глинами, суглинками, супесями, песками и торфами [6]. Мощность торфов в исследуемом районе варьирует в пределах 0.5–4.0 м [44, 50]. Почвообразующими породами, как правило, выступают многолетнемерзлые органогенные породы. По ботаническому составу и морфологическим свойствам они близки эутрофным горизонтам низинных торфов. Олиготрофные горизонты с такими признаками согласно классификации и диагностике почв России называют остаточно-эутрофными [13, 22].

В профилях исследуемых почв устанавливали температурные датчики Термохрон. За период наблюдений (2020–2022 гг.) температура нижней части их профиля не поднималась выше 0°C. Согласно международной классификации почв WRB (World Reference Base for soil resources) [39], исследуемые почвы были отнесены к Cryic Histosols. Ключевые участки выбраны так, чтобы максимально охватить регион с севера на юг ($\pm 1^\circ$ от Полярного круга) и с запада на восток от 66° до 79° Е (рис. 1), и расположены в пределах Пур-Тазовского (Т984, Т989, Т1166), Пур-Надымского (Т1003, Т1168), Обь-Надымского (Т1015, Т1016, Т1090, Т1169) и Пякупур-Айваседапурского (Т1024) междуречий, а также на левом берегу р. Обь в 5 и 12 км западнее г. Лабитнанги (Т1089, Т1006). Дополнительно пробы почв отбирали в пределах Ханты-Мансийского автономного округа в северной части бассейна р. Аган в 33 км южнее от границы с ЯНАО (Т1033). Схема отбора проб представлена на рис. 1. Отбор проб проводили в сентябре 2020–2022 гг. С целью исключения загрязненных участков пробы почв отбирали на удалении от видимых антропогенных источников воздействия, в том числе эксплуатируемых нефтяных и газовых месторождений, а также автомобильных и железных дорог.

Образцы торфяных почв отбирали по горизонтам, с учетом признаков остаточной эутрофности и деградации, включая верхнюю часть многолетнемерзлых пород. Пробы отбирали в полиэтиленовые пакеты и транспортировали при (-18°C) в Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (ИПА СО РАН, г. Новосибирск) для проведения аналитических работ. Подготовка проб торфа к



Рис. 1. Схема отбора проб на территории Западной Сибири.

анализам включала их разморозку, высушивание до воздушно-сухого состояния и измельчение в мельнице до состояния пудры.

Свойства почв, прямо или косвенно определяющие содержание и подвижность ХЭ, определяли в лаборатории рекультивации почв ИПА СО РАН. Величину pH измеряли в водной суспензии с использованием кондуктометра Hanna-213 в комплекте с электродом ЭСК 1060/7 (ГОСТ 11623-89). Содержание общего углерода ($C_{\text{общ}}$) и азота ($N_{\text{общ}}$) определяли на CHN-анализаторе Perkin Elmer 2400 Series II (США). Зольность почв определяли

по ГОСТ 11306-2013. Содержание углерода, окисляемого при мокром сжигании при взаимодействии с $K_2Cr_2O_7$ в 50%-ном растворе серной кислоты ($C_{\text{мок}}$), устанавливали по ГОСТ 26213-21. Применение данного метода из-за не полного сжигания органического вещества торфов не рекомендуется использовать при оценке запасов углерода [51]. Однако отношение $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{мок}}$ применяется для расчета степени внутримолекулярной окисленности [1, 14, 23], а также степени педогенной зрелости органического вещества [27], которые наряду с $C_{\text{общ}}/N_{\text{общ}}$ могут служить для

оценки качественного состояния систем органических веществ. Степень педогенной зрелости выражается в процентах $C_{\text{мок}}$ от $C_{\text{общ}}$, максимальные значения которой характерны для высокогумусированных почв, снижаясь по мере увеличения неспецифического органического вещества [26]. Таким образом, педогенная зрелость косвенно отражает степень гумусированности органического вещества торфов, а, следовательно, и наличие органических соединений, оказывающих влияние на подвижность металлов [43, 53].

Общее (валовое) содержание металлов определяли в лаборатории биогеохимии почв ИПА СО РАН методом оптической атомно-эмиссионной спектроскопии с использованием дугового аргонного двухструйного плазмотрона, спектрометра (PGS-2) и многоканального анализатора эмиссионных спектров (МАЭС). Предварительно пробы озоляли в муфельной печи при температуре 450°C.

Концентрацию подвижных форм металлов определяли методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AAnalyst400, экстрагент — 1 М раствор $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с pH 4.8 (ААБ), соотношение почвенный образец : раствор составляло 1 : 50 (ПНД Ф 16.2.2.2.3.71-2011). Данный экстрагент характеризуется смешанным механизмом воздействия, ионы переходят в раствор в результате реакций ионного обмена, гидролиза некоторых легкогидролизуемых соединений под действием ионов водорода, образования растворимых ацетатных или аммонийных комплексных соединений и т.п. При этом извлекаются лишь наименее прочносвязанные ионы, что позволяет характеризовать запас ХЭ, способных переходить в сопредельные среды, т.е. растения и природные воды [16].

Для калибровки приборов и контроля точности измерений концентраций ХЭ использовали стандартные образцы почв (СДПС-1, СЧТ-3 [33], САДПП-08/6 ОСО № 10902, САЧВП-05/7 ОСО № 21301) и растений (ЛБ-1 ГСО 8923-2007, Тр-1 ГСО 8922-2007). Полученные результаты укладывались в аттестованные значения.

Статистическую обработку данных проводили при помощи пакетов программ Microsoft Office Excel и PAST V2.17. Для выявления взаимосвязи различных свойств олиготрофных горизонтов и их изменений в широтном градиенте был проведен корреляционный анализ с применением рангового коэффициента корреляции Спирмена ($p < 0.05$ и < 0.01). При проведении статистического анализа значения концентраций подвижных форм ХЭ, определенных ниже предела обнаружения, были заменены на значения, равные половине нижнего предела обнаружения элемента (РД 52.18.885-2019). Оценку связи подвижности исследуемых

ХЭ со свойствами почв, ее определяющими, проводили при помощи метода главных компонент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства торфяных почв. Проведенные полевые исследования показали, что морфологический облик торфяных олиготрофных почв плоскобугристых болот территории Ямало-Ненецкого автономного округа представлен сочетанием торфяных горизонтов различного ботанического состава с разной степенью разложения растительных остатков. В целом исследуемые почвы характеризуются сравнительно небольшой мощностью торфяных горизонтов (в среднем около 1 м). Мощность сезонно-талого слоя в период проведения работ составляла 50–85 см. Дифференцированность торфяной залежи в большинстве исследуемых почв обусловлена остаточной эутрофностью. Торфяные олиготрофные остаточно-эутрофные горизонты (ТОте) были сформированы на начальном этапе торфонакопления в гидроморфных условиях. Горизонты ТОте, также, как и верхняя часть многолетнемерзлых пород (ТОте $\perp$), характеризуются более темной окраской и преобладанием остатков гидрофильной растительности — пушицы, осоки, хвощей и древесных фрагментов [22]. В настоящее время в пределах сезонно-талого слоя данные горизонты приурочены к нижней надмерзлотной части профиля. Формула почв выглядит следующим образом ТО–ТОте–ТОте $\perp$. Плотность данных горизонтов выше, чем у других горизонтов исследуемых почв и варьирует от 0.20 до 0.25 г/см³ [27].

В составе растительных остатков торфяных олиготрофных горизонтов, не имеющих признаков деградации и эутрофности (ТО), преобладает сфагнум. Такие горизонты отличаются более низкой плотностью, которая изменяется в интервале 0.05–0.18 г/см³ при средних значениях 0.09 г/см³. Как правило, верхняя часть профиля почв характеризуется наличием перегнойного материала, указывающего на активное протекание процессов деградации олиготрофных горизонтов (ТОh) [47]. Тем не менее, признаки деградации, а также более высокая доля в составе органического материала остатков кустарничков существенно не сказываются на плотности почв, слагающих данные горизонты. Формула почв с признаками деградации выглядит как ТОh–ТО–ТОте–ТОте $\perp$. Плотность горизонтов ТОh остается близкой к плотности горизонтов ТО и колеблется в пределах от 0.06 до 0.19 г/см³ при средних значениях 0.10 г/см³.

Свойства исследуемых торфов, прямо или косвенно определяющие подвижность металлов в почвах, отличаются в различных горизонтах (табл. 1). В целом, величина pH водной суспензии

Таблица 1. Основные химические и физико-химические свойства олиготрофно-торфяных горизонтов исследуемых почв

Параметр	Горизонт			
	TOh (<i>n</i> = 9)	TO (<i>n</i> = 14)	TOte (<i>n</i> = 18)	TOte⊥ (<i>n</i> = 15)
pH	<u>3.7–4.5</u> 4.1(4.1)	<u>3.0–4.5</u> 3.4(3.4)	<u>3.6–4.4</u> 3.8(3.7)	<u>3.6–4.5</u> 4.1(4.1)
Зольность, %	<u>2.5–9.9</u> 5.7(5.1)	<u>1.1–3.9</u> 2.2(2.2)	<u>1.5–8.6</u> 5.4(5.5)	<u>1.9–7.6</u> 4.2(3.5)
C _{общ} , %	<u>41.6–48.4</u> 45.7(46.4)	<u>44.4–50.1</u> 46.4(46.7)	<u>46.9–52.7</u> 49.6(50.2)	<u>45.8–55.4</u> 49.6(48.5)
C _{мок} , %	<u>31.1–37.0</u> 34.6(35.8)	<u>32.7–39.2</u> 36.1(36.1)	<u>30.4–45.9</u> 37.0(35.2)	<u>37.3–48.9</u> 42.0(40.9)
N _{общ} , %	<u>1.19–1.85</u> 1.56(1.60)	<u>0.30–1.31</u> 0.90(0.99)	<u>1.36–3.04</u> 2.13(2.03)	<u>1.96–2.85</u> 2.35(2.29)
C/N	<u>29.1–46.1</u> 35.3(33.0)	<u>44.1–179.3</u> 70.6(54.9)	<u>18.5–45.0</u> 30.1(29.9)	<u>19.7–33.0</u> 25.3(24.2)
C _{мок} /C _{общ} × 100, %	<u>74.7–76.5</u> 75.8(76.3)	<u>68.8–83.9</u> 77.8(77.9)	<u>60.3–90.7</u> 74.9(70.4)	<u>77.4–92.2</u> 84.8(84.7)

Примечание. Здесь и далее над чертой — минимальные и максимальные значения, под чертой — средние, в скобках — медианные значения.

находится в области сильнокислых значений. Максимальные средние и медианные значения pH характерны для горизонтов TOh и TOte⊥. Горизонты TOte и TO более кислые, максимальный разброс значений отмечается в TO. Зависимости значений pH торфов от географической широты расположения участка исследования не выявлено, однако проявилась слабая корреляционная связь значений pH торфов с их зольностью (0.53 при *n* = 33), которая усиливается в горизонтах TOte (до 0.72).

Зольность образцов почв исследуемых горизонтов не превышает 10%. Максимальная зольность (до 30% и более) была зафиксирована в горизонте TOh Пур-Тазовского междуречья (T1166). Как указано в работе [21], аномально высокая зольность верхних торфяных горизонтов данного района обусловлена влиянием Заполярного нефтегазо-конденсатного месторождения. По этой причине проба T1166 TOh была исключена из статистической выборки. Минимальными значениями зольности характеризуются горизонты TO и далее увеличиваются в ряду TO < TOte⊥ < TOte < TOh. Следует отметить, что зольность остаточно-эутрофных горизонтов в пределах сезонно-талого слоя выше, чем в аналогичных горизонтах верхней части многолетнемерзлых пород, что, вероятно, связано с наличием геохимического мерзлотного барьера [25, 57]. В пространственном отношении максимальная зольность фиксируется в пробах

почв, отобранных за Полярным кругом в пределах Пур-Тазовского междуречья (T984, T989, T1015), минимальная — в почвах Пякупур-Айва-седапурского междуречья (T1024) и в северной части бассейна реки Аган (T1033). Помимо pH, зольность также демонстрирует слабую корреляцию с широтой местности (0.50), которая усиливается в образцах почв, относящихся к горизонтам TO (до 0.65).

Содержания общего (C_{общ}) и углерода, окисляемого при мокром сжигании (C_{мок}), в торфяных почвах варьируют в интервалах 41.6–55.4 и 31.1–48.9% соответственно. Их средние значения увеличиваются в ряду TOh < TO < TOte < TOte⊥. Более высокие концентрации C_{общ} и C_{мок} отмечены в почвах Пур-Тазовского (T989, T1166) и Пур-Надымского (T1003, T1168) междуречий.

Содержание общего азота (N_{общ}) максимально в горизонтах с признаками остаточной эутрофности (TOte и TOte⊥) — в 1.4 раза выше, чем в горизонтах TOh, и более чем в 2 раза больше по сравнению с горизонтами TO. По всей видимости, увеличение содержания N_{общ} связано с повышенной метаболической активностью микроорганизмов, отмечаемой на границе сезонно-талого слоя и многолетнемерзлых пород [49]. Значения отношения C/N обратно пропорциональны содержанию азота. Оба показателя демонстрируют корреляционную зависимость с зольностью торфов (*r* = 0.66 для N_{общ}, *r* = –0.65 для C/N), усиливающую

юся в горизонтах ТО (до 0.67 и –0.73 соответственно). Кроме того, в данных горизонтах содержание $N_{\text{общ}}$ и C/N коррелируют также с широтой местности (0.74 и –0.77 соответственно). Степень педогенной зрелости (качественный показатель органического вещества торфов, характеризующий устойчивость органического вещества торфов к окислению) максимальна для почв мерзлотных горизонтов. Все вышеотмеченное косвенно свидетельствует о большей гумусированности горизонтов TОte $\perp$, следовательно, и большем наличии в этих горизонтах органических соединений, оказывающих влияние на увеличение подвижности металлов [43, 53].

Таким образом, анализ свойств почв, определяющих подвижность металлов, показывает, что несмотря на различный генезис, горизонты с признаками деградации и остаточной эутрофности ближе по свойствам друг к другу, чем к лежащему между ними горизонту ТО. Верхняя часть горизонтов TОte $\perp$ отличается от аналогичных горизонтов сезонно-талого слоя, что проявляется в качестве (судя по C/N и ПЗ) органического вещества, незначительном увеличении значений pH и низкой зольности. Данные отличия создают условия для миграции ХЭ в водную среду при увеличении мощности сезонно-талого слоя.

Общее содержание исследуемых макроэлементов в исследуемых горизонтах соответствовало значениям, установленным другими исследователями [17, 18, 21, 45, 56]. В целом по региону содержание макроэлементов в горизонтах TOh выше, чем в нижележащих горизонтах ТО (рис. 2). По всей видимости, это связано не только с деградацией верхних горизонтов торфов, но и с наличием геохимического окислительного барьера на границе относительно сухого горизонта TOh и увлажненных большую часть года горизонтов ТО [18]. В среднем отношение TOh/ТО по общему содержанию элементов составляет: Fe – 4.7, Ca – 1.1, K – 1.5, Na – 1.6, Mg – 1.4, для подвижных форм металлов: Fe – 55.0, K – 3.4, Mg – 1.3, Ca и Na – 1.1. При сравнении соотношений TОte/ТО фиксируется увеличение концентрации только для валового и подвижного Fe (соответственно в 2.5 и 3.3 раза). При этом наибольшие значения содержания Fe фиксировались в горизонтах, подстилаемых минеральными глеевыми горизонтами, находящимися в пределах сезонно-талого слоя. Подобное влияние нижележащих глеевых горизонтов в почвах ЯНАО отмечалось и другими авторами [20, 41]. Кроме того, в работе [28] описано наличие в верхней части профиля почв остаточно-эутрофных горизонтов, обогащенных зольными элементами, которые подстилались не минеральными, а торфяными горизонтами без признаков эутрофности. Дополнительно отмечалось, что в торфяных почвах, сформированных без участия многолетней мерзлоты, миграционные процессы нивелируют

различия во внутрипрофильном распределении содержания макроэлементов [28].

Стоит отметить, что в исследуемых горизонтах содержание Ca оставалось практически неизменным как при сравнении его подвижных форм и валового содержания, так и концентраций в различных генетических горизонтах. В то же время в пробах горизонтов TОte $\perp$, отобранных в верхней части многолетнемерзлых пород, были зафиксированы повышенные концентрации Ca (до 5600–8800 мг/кг), что, по всей видимости, связано с наличием геохимического барьера на границе сезонно-талого слоя [25, 41]. В этих же горизонтах фиксировались и выбивающиеся из общего диапазона концентрации K.

Остаточно-эутрофные горизонты верхней части многолетнемерзлых пород (TОte $\perp$) характеризуются более высокими концентрациями элементов, по сравнению с вышележащими горизонтами TОte. На фоне более низких значений зольности и менее кислой pH общее содержание Fe в TОte $\perp$ увеличивается в 1.2 раза, K – в 1.4, Ca – в 2.9, Mg – в 3.1. Концентрации подвижных форм в горизонтах TОte $\perp$ также возрастают: для Fe – 2.0, K – 1.5, Ca – 3.0, Mg – 3.1 раза.

Наличие мерзлотного геохимического барьера [25, 57] подтверждают также высокие значения коэффициентов корреляции Fe с зольностью для остаточно-эутрофных горизонтов, которые составляют 0.88 для валового содержания элемента и 0.94 для концентраций его подвижных форм (при $n = 15$). Между зольностью и валовыми концентрациями K установлены слабые корреляционные зависимости (0.63). Для образцов, отобранных из горизонтов TОte, были установлены отрицательные корреляционные связи между валовыми содержаниями и концентрациями подвижных форм элементов Mg и K с содержанием общего углерода (–0.58 и –0.74). В горизонтах TОte $\perp$ вышеуказанные связи ослабевали.

В горизонтах ТО сильная корреляционная зависимость Fe и зольности была отмечена только для валового содержания (0.84). В данных горизонтах с зольностью имели взаимосвязь также валовые содержания и концентрации подвижных форм Na (соответственно 0.96 и 0.93) и Ca (0.60 и 0.62). Данные элементы продемонстрировали корреляционные зависимости с широтой местности – Ca (0.75 и 0.87), Na (0.58 и 0.63).

В горизонтах TOh статистически значимых корреляций между содержанием элементов и основными свойствами почв выявлено не было, что, по всей видимости, связано в большей степени не с генетическими особенностями данных горизонтов, а с локальными условиями их трансформации [15] и дополнительным поступлением элементов на поверхность почв вследствие воз-

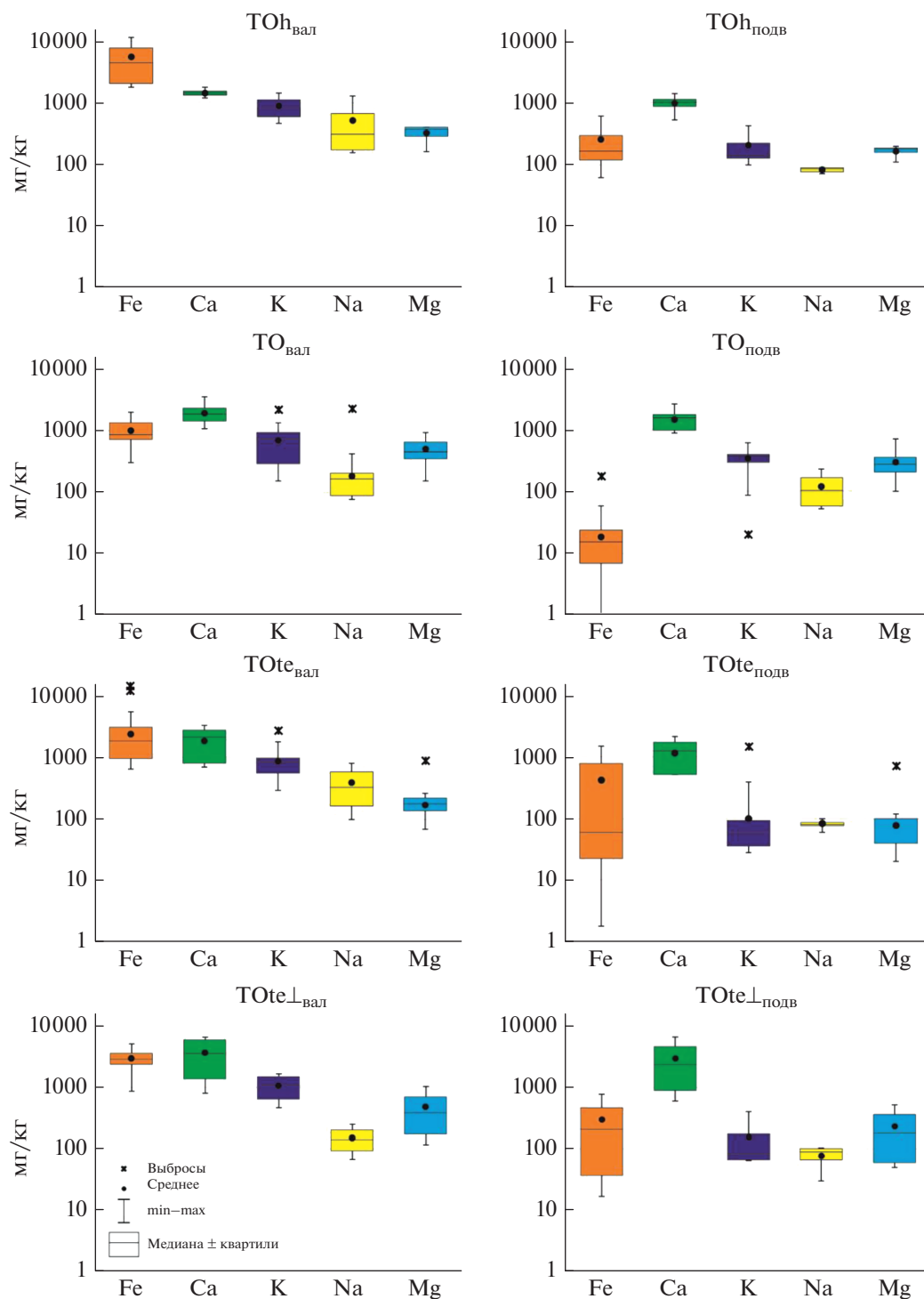


Рис. 2. Распределение валового содержания и концентраций подвижных форм макроэлементов в профилях торфяных олиготрофных почв ЯНАО.

душного массопереноса [21], а также поверхностного стока.

Оценка содержания металлов исследуемых горизонтов, подлежащих нормированию, показала, что их содержания не превышают установленные

ПДК и ОДК (СанПиН 1.2.3685-21) и характеризуются сравнительно низкими концентрациями, иногда даже ниже пределов обнаружения используемых методов анализа (рис. 3). Распределение валового содержания элементов и их подвижных форм между горизонтами TOh и TO по глубине

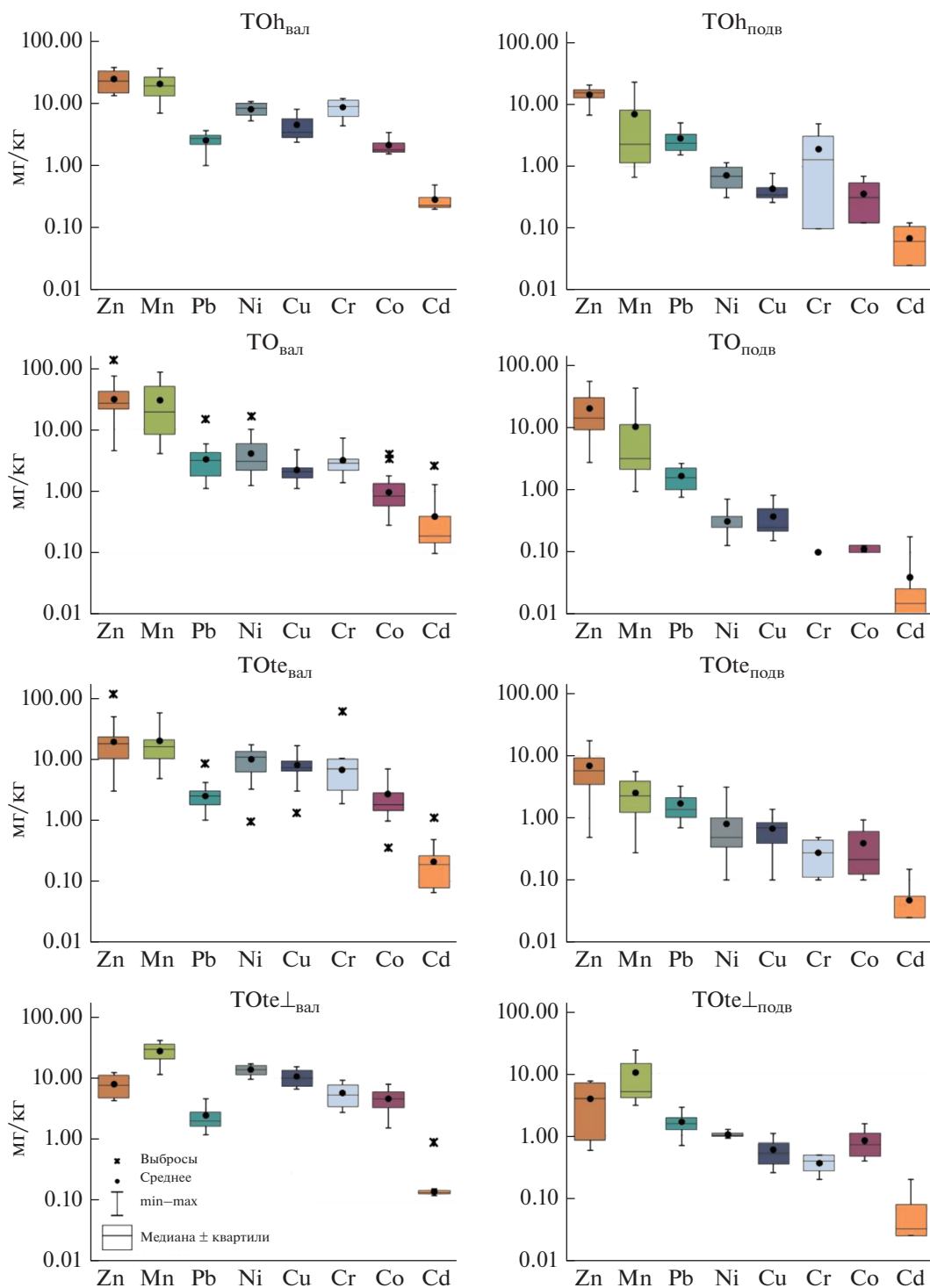


Рис. 3. Распределение валового содержания и концентраций подвижных форм микроэлементов в профилях торфяных олиготрофных почв ЯНАО.

профиля характеризуются двукратным снижением концентраций Co, Cr, Cu и Ni. Подобные результаты были получены в работе [29] для торфяных олиготрофных почв Архангельской области. Однако представленные данные в силу сравни-

тельно низких концентраций исследуемых микроэлементов нельзя связать с загрязнением торфа металлами, которое характерно для северных территорий европейской части России [35] и других стран [37, 38, 52]. По всей видимости, для почв

Западной Сибири увеличение содержания металлов в верхней части профиля связано не с антропогенным загрязнением, а с протекающими климатическими изменениями, способствующими усилению естественной трансформации торфяных горизонтов в грубогумусовые [15]. Об этом также свидетельствует более низкое содержание в горизонтах TOh Cd , Pb и Zn , которое характерно для антропогенного загрязнения [7, 31, 46, 54]. Также в перераспределении подвижных форм микроэлементов не исключена роль криогенных процессов. Предполагается, что морозное иссушение верхней части торфяной толщи сопровождается притоком охлажденных поровых растворов из нижележащих слоев торфа, обогащая верхние горизонты микроэлементами [32]. Однако миграция поровых вод из средней толщи торфов, которая является зоной криогенного выщелачивания, происходит по направлению к фронтам промерзания, т.е. и вверх, и вниз, что также способствует выносу и накоплению элементов в нижележащих горизонтах. Ниже по профилю в остаточно-эутрофных горизонтах (TOte) валовые содержания Mn , Ni , Cu , Cr и Co снова увеличиваются, достигая максимальных концентраций в горизонтах верхней части многолетнемерзлых пород ($\text{TOte}\perp$). В среднем наблюдается увеличение валового содержания Ni и Zn — в 1.3, Cu и Pb — в 1.4, Cd и Co — в 1.8, Mn — в 2.5 раза.

Аналогичная тенденция отмечается в профильном распределении подвижных форм исследуемых ХЭ. Исключение в данном случае составляет Cd , концентрации которого в горизонтах TOte выше, чем в TO . Для подвижных форм также характерно увеличение содержания металлов в остаточно-эутрофных мерзлотных горизонтах $\text{TOte}\perp$. Содержания Cd , Ni , Cu в верхней части многолетнемерзлых пород выше в 1.2 раза, Cr , Pb и Zn — в 1.4 раза, Co — в 1.6, Mn — в 3.4 раза, чем вышележащем горизонте. Стоит повторно отметить, что наблюдаемое увеличение содержания металлов в горизонтах $\text{TOte}\perp$ фиксируется на фоне одинаковой с TOte зольности.

При оценке взаимосвязи валового содержания и концентрации подвижных форм исследуемых ХЭ с основными свойствами горизонтов TOte отмечается сильная положительная корреляция для Cr и Pb с зольностью (0.65–0.81). Содержание кобальта продемонстрировало отрицательную корреляцию с содержанием общего углерода (–0.65 — валовый, –0.79 — подвижный). Данные элементы, а также Mn , имеют слабую положительную связь с величиной pH (0.61–0.70).

В горизонтах TO связь валовых концентраций с зольностью проявилась в ряду $\text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Co} > \text{Mn}$ (0.60–0.86), исключение составили Cr , Pb и Zn . Слабая зависимость между подвижными формами ХЭ и зольностью была отмечена для Cd и

Cu . Взаимосвязь с концентрацией азота установлена для валового содержания $\text{Co} > \text{Cu} > \text{Cd}$ (0.62–0.73), а также подвижных форм Ni и Co (0.69 и 0.66). Отмеченная связь с азотом усиливалась и приобретала отрицательный знак при анализе корреляции с C/N . С широтой местности была выявлена сильная положительная связь увеличивающихся с юга на север валовых содержания Cd , Co и подвижных форм соединений Mn .

Отношения валовых содержаний и концентраций подвижных форм исследуемых ХЭ варьируют в широких диапазонах значений как для внутри-профильного, так и для пространственного распределения в одинаковых горизонтах (табл. 2). Причиной этому служит ряд факторов, в том числе растворимость элементов, их биофильность, зольность горизонтов, физико-химические свойства почв и др. [8, 16, 19, 30]. Кроме того, на отдельных территориях, содержание некоторых элементов подвержено влиянию как природных факторов, например, близость Полярного Урала для левобережья Оби [55], так и техногенных — наличие локального загрязнения, связанного с добычей углеводородов [31], последние из которых не рассматривались в данной работе.

Средние значения подвижности элементов в исследуемых почвах увеличиваются в ряду от Fe (2.7–7.8) до Ca (71.1–87.1) и Pb (69.7–97.3). Максимальная амплитуда значений фиксируется для Na и Cr в TOh , Na , Cr и Cd в TO , Na , Cr , Cd , Mg , Mn и Zn в TOte . Минимальный разброс значений отмечается у Fe , Ni и Cu . При сравнении почвенных горизонтов установлено, что металлы в горизонтах $\text{TOte}\perp$ обладают максимальной подвижностью и характеризуются наименьшим разбросом значений.

При расчете процента подвижности по каждому конкретному профилю получается, что в среднем в горизонтах $\text{TOte}\perp$ значения выше, чем в TOte для K и Mn в 1.2 раза, Fe — 1.4, Ni и Cu — 1.6, Na — 2.0, Cd и Co — в 2.7 раз (рис. 4). Подвижность Ca , Mg , Cr , Pb и Zn остается на том же уровне.

Результаты анализа данных методом главных компонент показали (табл. 3), что тесную положительную связь с первой главной компонентой имеет подвижность таких элементов, как Pb , Mn , Cr и содержание окисляемого, определяемого методом мокрого сжигания. В меньшей степени главную компоненту определяют подвижность Cd , Ca , содержание общего углерода и степень педогенной зрелости органического вещества. Вторая компонента тесно связана с подвижностью Mg , Ca , Co , Cr , K и отношением углерода и азота. Отрицательно выраженную связь со второй компонентой имеют зольность и содержание азота. Третья компонента слабо коррелирует с подвижностью Ni .

Таблица 2. Доля подвижных форм металлов в горизонтах торфяных олиготрофных почв севера Западной Сибири, %

Химический элемент	Горизонт			
	TOh (<i>n</i> = 9)	ТО (<i>n</i> = 14)	TOte (<i>n</i> = 18)	TOte⊥ (<i>n</i> = 15)
Fe	2.9–6.1	0.2–13.0	0.9–26.8	1.6–14.9
	4.4(4.4)	2.7(1.8)	7.8(3.9)	7.7(7.2)
Ca	42.9–100.0	58.6–100.0	39.3–100.0	62.7–100.0
	71.1(70.7)	81.9(82.6)	79.4(83.9)	87.1(92.8)
K	9.2–59.5	29.4–77.3	6.0–83.2	81.3–100.0
	29.0(23.6)	49.3(47.0)	18.3(7.9)	14.6(12.1)
Na	6.7–100.0	10.1–100.0	10.2–100.0	62.7–100.0
	56.1(58.8)	78.7(100.0)	43.4(39.6)	95.3(100.0)
Mg	44.2–66.5	33.5–97.2	10.5–100.0	26.5–93.6
	52.8(50.3)	64.1(62.7)	45.7(50.0)	59.6(59.1)
Cd	5.1–50.0	1.9–100.0	7.5–100.0	26.5–93.6
	28.4(29.3)	46.2(51.5)	47.7(40.4)	59.6(59.1)
Co	7.4–37.1	3.1–47.6	2.4–52.4	9.5–46.7
	16.8(11.4)	29.0(37.7)	24.0(26.3)	30.8(33.4)
Cr	0.8–100.0	3.0–100.0	4.1–100.0	35.6–100.0
	31.5(12.5)	48.0(51.7)	46.6(35.5)	75.6(83.4)
Cu	0.7–11.1	4.4–61.2	1.4–19.9	3.1–24.1
	8.0(10.2)	24.2(18.5)	11.0(12.2)	10.2(6.7)
Ni	6.2–12.3	0.7–16.4	1.9–25.3	3.2–15.2
	8.5(7.7)	9.5(10.2)	11.2(8.0)	7.8(6.3)
Pb	59.3–100.0	27.1–100.0	30.3–100.0	89.2–100.0
	76.4(73.1)	69.9(60.0)	76.6(84.1)	97.3(100.0)
Mn	5.9–64.8	3.5–65.1	3.1–100.0	25.8–96.8
	25.5(15.6)	32.0(26.5)	46.0(44.6)	64.2(67.1)
Zn	42.6–100.0	40.0–100.0	8.3–100.0	13.8–66.4
	59.8(48.3)	67.1(69.9)	42.6(39.7)	31.4(22.6)

Оценивая расположение исследуемых торфяных горизонтов в пространстве двух главных компонент (рис. 5), можно отметить обособление горизонтов, не имеющих признаков деградации и остаточной эутрофности (ТО). Горизонты ТО локализируются в области, для которой характерно широкое отношение C/N и минимальные значения зольности и pH. В этих условиях максимальную подвижность приобретают K, Cu, Zn, Mg.

Связь зольности и pH с подвижностью железа более выражена для проб, отобранных из горизонтов TOte. В данных горизонтах вместе с увеличением содержания $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{мок}}$ возрастает подвижность Pb, Mn, Cd и Cr. В этой же области в пределах границ, максимально приближенных к ТО, располагаются пробы, отобранные из гори-

зонтов TOh. В целом значения подвижности элементов в этом горизонте находятся между значениями, характерными для горизонтов ТО и TOte, и имеют выраженную связь с зольностью. Исключение составляют Ca, Cd, Cu и Mn, подвижность которых в TOh минимальна.

В области проб горизонтов TOte⊥ вместе с увеличением содержания $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{мок}}$, а также степени педогенной зрелости ($C_{\text{мок}}/C_{\text{общ}} \times 100, \%$) и $N_{\text{общ}}$ имеет место увеличение миграционной способности Pb, Mn, Cd и Cr. При этом следует заметить, что фиксируемое повышение миграции происходит на фоне одинаковой или в незначительной степени снижающейся зольности. Отмеченные закономерности говорят, что изменение качественного состава органического вещества

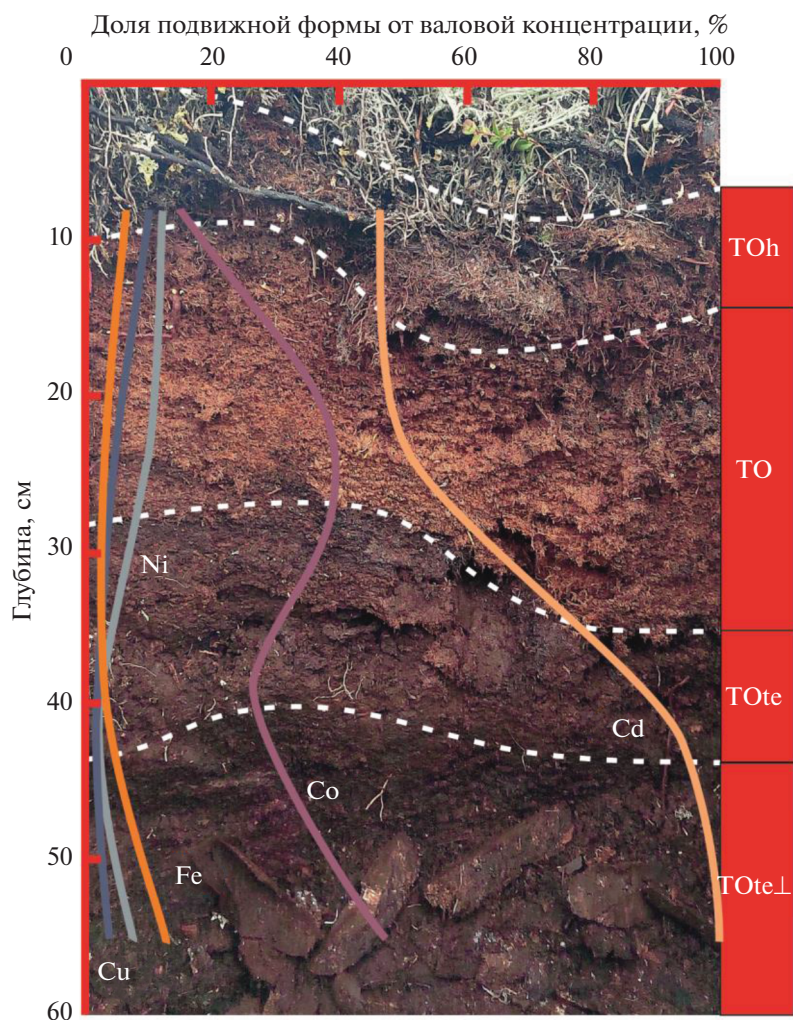


Рис. 4. Изменение доли подвижных форм Cu, Ni, Fe, Co и Cd по профилю торфяной олиготрофной остаточно-эутрофной почвы (Т1169).

остаточно-эуотрофных мерзлотных горизонтов сопровождается повышением мобильности металлов, обладающих высокой способностью к комплексообразованию с низкомолекулярными органическими кислотами [58]. Таким образом, верхняя часть многолетнемерзлых пород является геохимическим барьером, на котором происходит аккумуляция тяжелых металлов за счет образования их органических комплексов, которые, в условиях увеличения сезонно-талого слоя, могут оказать влияние на химический состав природных вод территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что специфика торфяных олиготрофных почв северных территорий Западной Сибири, неподверженных антропогенному влиянию, проявляется в дифференциации морфологического профиля, связан-

ной не только с ботаническим составом различных горизонтов, но и с условиями их формирования и трансформации. В целом торфяные олиготрофные почвы имеют небольшую мощность сезонно-талого слоя (50–85 см). Нижняя часть профиля имеет признаки остаточной эуотрофности (горизонты TOte), характерной и для органогенных многолетнемерзлых пород (горизонты TOte⊥). Верхняя часть профиля исследуемых почв часто имеет признаки деградации олиготрофных горизонтов (горизонты TOh).

Свойства почв, влияющие на поведение металлов, дифференцируются по почвенному профилю. Значения pH водных суспензий находятся в области сильноокислых значений и увеличиваются в ряду $TO < TOte < TOte\perp < TOh$. Максимальная зольность отмечается в верхних горизонтах с признаками деградации, ниже по профилю уменьшается и возрастает в остаточно-эуотрофных горизонтах. В верхней части многолетне-

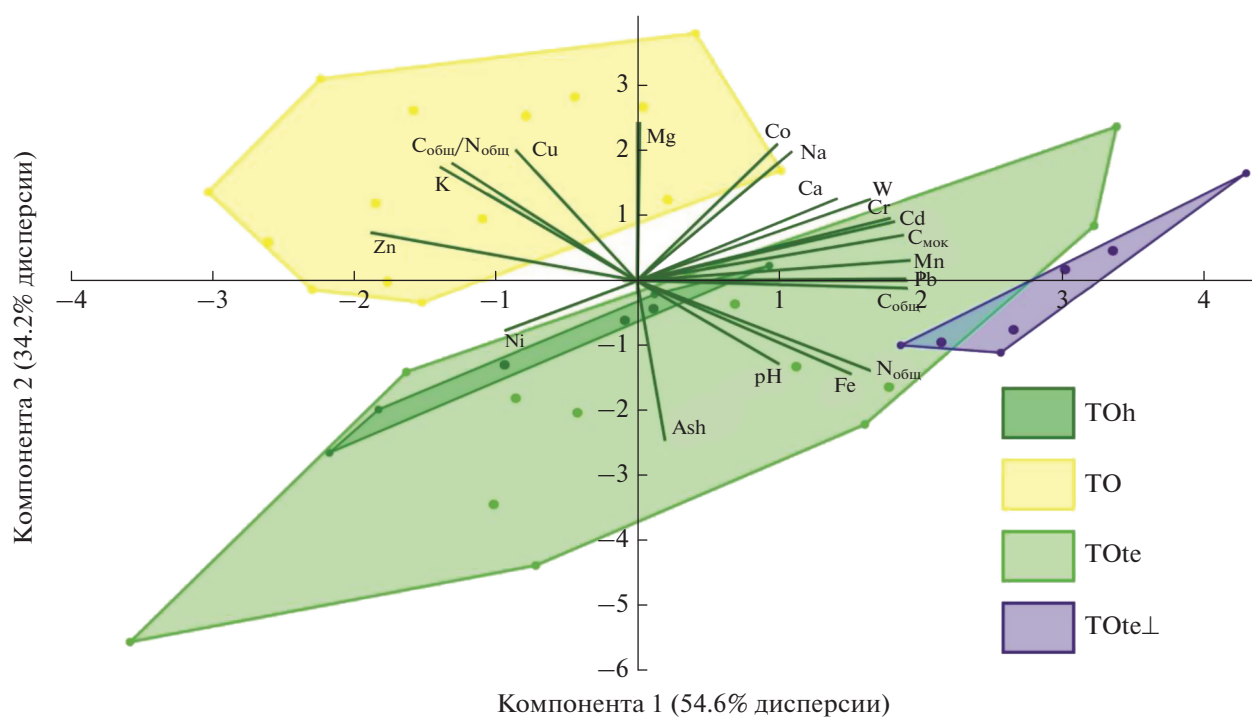


Рис. 5. Распределение исследуемых проб торфяных горизонтов в пространстве двух главных компонент.

Таблица 3. Корреляционная связь главных компонент и процента подвижных форм исследуемых металлов ($n = 41$)

Показатель	Компонента 1 (54.6% дисперсии)	Компонента 2 (34.2% дисперсии)	Компонента 3 (11.1% дисперсии)
$C_{общ}$	0.59	0.24	-0.15
N	0.50	-0.62	-0.09
$C_{общ}/N$	-0.38	0.59	0.16
$C_{мок}$	0.77	0.50	-0.12
$C_{мок}/C_{общ} \times 100$	0.58	0.50	-0.05
pH	0.34	-0.44	-0.49
Ash	-0.25	-0.77	0.26
Fe	0.31	-0.39	0.33
Ca	0.63	0.51	0.15
K	-0.41	0.56	-0.12
Na	0.39	0.71	-0.01
Mg	0.40	0.81	0.18
Cd	0.67	0.48	0.04
Co	0.35	0.62	0.13
Cr	0.72	0.59	0.31
Cu	-0.16	0.45	0.49
Ni	-0.19	-0.12	0.72
Pb	0.84	0.36	0.03
Mn	0.74	0.25	0.10
Zn	-0.38	0.12	0.10

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

мерзлых пород зольность ниже или остается на уровне значений, характерных для остаточно-эутрофных горизонтов. Содержание общего и углерода, окисляемого мокрым сжиганием в торфяных почвах, увеличивается вниз по профилю и достигает максимума в T₀te₁, при этом качество органического вещества меняется за счет уменьшения отношений C/N и C_{общ}/C_{мокс}.

Характерной особенностью распределения макроэлементов в неподверженных техногенному загрязнению торфяных олиготрофных почвах северной части Западной Сибири является наличие двух максимумов по глубине профиля. Первый приурочен к горизонтам T₀h, второй — к T₀te₁. Валовое содержание и концентрации подвижных форм Fe, Ca, K и Mg в верхней части многолетнемерзлых пород увеличиваются по сравнению с нижней частью сезонно-талого слоя (T₀te) в 1.2–3.1 раза. Данная тенденция также отмечается для Cd, Ni, Cu, Cr, Pb, Zn, Co и Mn. Вместе с этим на фоне снижения зольности и кислотности pH в горизонтах T₀te₁ увеличивается доля подвижных K и Mn — в 1.2 раза, Fe — 1.4, Ni и Cu — 1.6, Na — 2.0, Cd и Co — в 2.7 раз.

Статистический анализ с использованием метода главных компонент показал, что низкая зольность, pH и широкое отношение C/N связаны с мобилизацией K, Cu, Zn и Mg, активно накапливающихся растительностью, что и обуславливает их высокую подвижность в горизонтах T₀. В горизонтах T₀te и T₀te₁ с увеличением зольности, pH и общего азота повышаются подвижность Fe, Mn, Pb, Cd и Cr. Данные элементы имеют максимальную миграционную способность в верхней части многолетнемерзлых органогенных пород, образуя с органическим веществом органо-минеральные комплексы.

Таким образом, рассмотрев особенности содержания металлов и оценив их подвижность в незатронутых техногенезом торфяных олиготрофных почвах севера Западной Сибири, можно сделать вывод, что увеличение мощности сезонно-талого слоя, обусловленное происходящими климатическими изменениями, повлечет за собой высвобождение и последующую миграцию ряда ХЭ. Отмеченное явление может отразиться на химическом составе природных вод и фоновых концентрациях тех элементов, увеличение миграции которых в настоящее время фиксируется в Арктических областях в связи с активным развитием нефтегазодобывающего комплекса России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Отбор проб торфов выполнен при финансовой поддержке государственного задания ТФ ИНГГ СО РАН (проект № 0266-2022-0016), химический анализ проб выполнен в рамках государственного задания

ИПА СО РАН (проект № 121031700-316-9). Интерпретация полученных данных выполнена при поддержке РНФ, проект № 20-77-10084.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов Е.В., Попов А.И.* Определение в одной пробе почвы углерода, азота, окисляемости органического вещества и углерода карбонатов // Почвоведение. 2005. № 2. С. 186–194.
2. *Аветов Н.А., Шишконокова Е.А.* Загрязнение нефтью почв таежной зоны Западной Сибири // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2011. Вып. 68. С. 45–55. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-45-55>
3. *Агбалян Е.В., Шинкарук Е.В., Попова Т.Л., Максименко Ю.И.* Эколого-геохимическая ситуация на территории Ямало-Ненецкого автономного округа по материалам элементного анализа биологических сред (волосы) населения // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 2(103). С. 34–40. <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.103.2.004>
4. *Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Яценко И.Г., Ельчанинова Е.А.* Экологическое состояние водных объектов на территории нефтедобывающих комплексов Среднего Приобья // Нефтехимия. 2017. Т. 57. № 3. С. 340–345. <https://doi.org/10.7868/S0028242117020034>
5. *Арестова И.Ю., Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю.* Эколого-геохимическая оценка состояния природной среды в районах нефтедобычи // Геохимия биосферы. М.: Смоленск, 2006. С. 41–42.
6. *Василевская В.Д., Иванов В.В.* Почвы севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 225 с.
7. *Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т., Трофимов С.Я.* Характеристика техногеохимических аномалий торфяных почв, загрязненных шламами в районе нефтедобычи в Среднем Приобье // Агрохимия. 2012. № 11. С. 82–90.
8. *Водяницкий Ю.Н., Смагин А.В., Яковлев А.С.* Факторы изменчивости содержания подвижных форм тяжелых металлов в почве // Экологический вестник Северного Кавказа. 2016. № 1. С. 27–38.
9. *Волкова Н.А., Иванова И.С., Соколов Д.А., Колубаева Ю.В., Чуйкина Д.А.* Концентрации и источники полициклических ароматических углеводородов в воде и донных отложениях рек северных нефтегазодобывающих территорий Западной Сибири // Известия Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 4. 135–148. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3924>
10. *Геокриология СССР. Западная Сибирь.* М.: Недра, 1989. 454 с.
11. *Грива Г.И.* Геоэкологические условия разработки газовых месторождений Ямала. Томск: Томский гос. ун-т, 2005. 352 с.
12. *Карпенко Л.В.* Оценка современного состояния болот лесотундровой подзоны в условиях слабого

- аэротехногенного загрязнения // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 59–66.
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3\(59-66\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(59-66))
13. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 14. Козут Б.М., Фрид А.С. Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // Почвоведение. 1993. № 9. С. 119–123.
 15. Лойко С.В., Кузьмина Д.М., Истигечев Г.И., Крицков И.В., Лим А.Г., Климова Н.В., Новоселов А.А., Константинов А.О., Новолодская Э.В., Кулижский С.П. Трансформация морфологических свойств почв вследствие закустаривания пятнистой тундры // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2022. № 59. С. 6–41.
<https://doi.org/10.17223/19988591/59/1>
 16. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Состав соединений тяжелых металлов в почвах. Ростов-на-Дону: Эверест, 2009. 208 с.
 17. Московченко Д.В. Биогеохимические особенности почв бассейна реки Мессояха (Тазовский район Ямало-ненецкого автономного округа) // Вестник Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2016. Т. 2. № 2. С. 8–21.
<https://doi.org/10.21684/2411-7927-2016-2-2-8-21>
 18. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Фоновое содержание подвижных форм металлов в почвах севера Западной Сибири // Вестник Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2015. Т. 1. № 3. С. 163–174.
 19. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Либроком, 2013. 168 с.
 20. 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.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>
 21. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Тигеев А.А. Элементный состав торфяных отложений верхового типа Пур-Тазовского междуречья // Географический вестник. 2020. № 1. С. 154–165.
<https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-1-154-165>
 22. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
 23. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Некоторые данные о степени внутримолекулярной окисленности гумуса разных типов почв (к вопросу о переводном коэффициенте с углерода на гумус) // Почвоведение. 1967. № 7. С. 85–95.
 24. Романенко Е.А., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А., Шигабаева Г.Н. Подвижные формы металлов в почвах Надым-Пуровского междуречья (Западная Сибирь) // Вестник Нижневартовского гос. ун-та. 2020. № 2. С. 136–145.
<https://doi.org/10.36906/2311-4444/20-2/18>
 25. Савичев О.Г., Мазуров А.К., Рудмин М.А., Хвещевская А.А., Даулетова А.Б. Изменения химического состава кислотных вытяжек по глубине торфяной залежи внутриболотных экосистем Васюганского болота (Западная Сибирь) // Известия Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 101–116.
<https://doi.org/10.18799/24131830/2018/9/2093>
 26. Соколов Д.А. Диверсификация почвообразования на отвалах угольных месторождений Сибири. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Новосибирск, 2019. 45 с.
 27. Соколов Д.А., Иванова И.С., Морозов С.В., Пчельникова Т.Г., Солдатова Е.А. Полициклические ароматические углеводороды в торфяных олиготрофных почвах северных территорий Западной Сибири // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1228–1240.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22100148>
 28. Степанова В.А., Покровский О.С. Макроэлементный состав торфа выпуклых верховых болот средней тайги Западной Сибири (на примере болотного комплекса “Мухрино”) // Вестник Томского гос. ун-та. 2011. № 352. С. 211–214.
 29. Сыпалов С.А., Кожеевников А.Ю., Иванченко Н.Л., Попова Ю.А., Соболев Н.А. Оценка загрязнения торфа некоторыми тяжелыми металлами в зависимости от глубины залегания // Химия твердого топлива. 2020. № 1. С. 38–42.
<https://doi.org/10.31857/S0023117720010107>
 30. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.
 31. Сысо А.И., Васильев С.В., Смоленцев Б.А., Сеньков А.А. Ландшафтно-геохимический анализ изменения природной среды в районах нефтедобычи // Сибирский экологический журн. 2001. Т. 8. № 3. С. 333–342.
 32. Тентюков М.П. Особенности распределения химических элементов в мерзлых почвах // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 3. С. 100–107.
 33. Шафринский Ю.С., Самохвалов С.Г., Беднаржевский С.С., Акинина Е.В., Налобин Д.П. Государственные стандартные образцы состава почв. Новосибирск: МАСС, 1998. 28 с.
 34. Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Болотные торфяные почвы таежной и подтаежной зон Западной Сибири на цифровой модели почвенной карты России масштаба 1 : 2500000 в формате классификации почв России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 223–240.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-223-240>
 35. Яковлев Е.Ю., Дружинина А.С., Дружинин С.В., Бедрина Д.Д., Орлов А.С., Спиров Р.К., Мищенко Е.В., Жуковская Е.В. Оценка физико-химических параметров и распределения металлов в верховом болоте Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 115–120.
<https://doi.org/10.17513/use.37401>
 36. Ala-aho P., Soulsby C., Pokrovsky, O.S., Kirpotin S.N., Karlsson J., Serikova S., Vorobyev, S.N., Manasypov R.M., Loiko S.V. Tetzlaff D. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape // J. Hydrology. 2018. V. 556. P. 279–293.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.024>
 37. Barrett S.E., Watmough S.A. Factors controlling peat chemistry and vegetation composition in Sudbury peatlands after 30 years of pollution emission reductions // Environmental Pollution. 2015. V. 206. P. 122–132.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.06.021>

38. Gallego J.L.R., Ortiz J.E., Sierra C., Torres T., Llamas J.F. Multivariate study of trace element distribution in the geological record of Roñanzas Peat Bog (Asturias, N. Spain). Paleoenvironmental evolution and human activities over the last 8000 cal yr BP // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 454–455. P. 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.083>
39. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna: Union of Soil Sciences, 2022. 234 p.
40. Ivanova I.S., Shirokova L.S., Rols J., Pokrovsky O.S. Partitioning of dissolved organic carbon, major element and trace metal during laboratory freezing of organic leachates from permafrost peatlands // *Appl. Sci.* 2023. V. 13. P. 4856. <https://doi.org/10.3390/app13084856>
41. Ji X., Abakumov E., Tomashunas V., Antcibor I., 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 // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2019. V. 76. P. 540–553. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00607-y>
42. Kuzmina D.M., Lim A.G., Loiko S.V., Shefer N., Shirokova L.S., Julien F., Rols J., Pokrovsky O.S. Dispersed ice of permafrost peatlands represents an important source of labile carboxylic acids, nutrients and metals // *Geoderma*. 2023. 429. 116256. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116256>
43. Lim A.G., Loiko S.V., Kuzmina D.M., Krickov I.V., Shirokova L.S., Kulizhskiy S.P., Pokrovsky O.S. Organic carbon, and major and trace elements reside in labile low-molecular form in the ground ice of permafrost peatlands: a case study of colloids in peat ice of Western Siberia // *Environ. Sci.: Processes Impacts*. 2022. V. 24. 266. P. 1443–1459. <https://doi.org/10.1039/D1EM00547B>
44. Lim A.G., Loiko S.V., Kuzmina D.M., Krickov I.V., Shirokova L.S., Kulizhskiy S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. Dispersed ground ice of permafrost peatlands: Potential unaccounted carbon, nutrient and metal sources // *Chemosphere*. 2021. V. 266. P. 128953. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128953>
45. Lim A.G., Loiko S.V., Raudina T.V., Volkova, I.I., Serezhina V.P. Element composition of peat deposits in flat frost mound bogs of the Pyakupur River (northern taiga of West Siberia) // *Ukrainian J. Ecology*. 2018. V. 8. P. 79–87. https://doi.org/10.15421/2018_190
46. Liu H., Gu Y., Qin Y., Yu Z., Huang X., Xie Sh., Zheng M., Zhang Zh., Cheng Sh. The elemental enrichments at Dajiuhu Peatland in the Middle Yangtze Valley in response to changes in East Asian monsoon and human activity since 20,000 cal yr BP // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 757. 143990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143990>
47. Loiko S., Raudina T., Lim A., Kuzmina D., Kulizhskiy S., Pokrovsky O. Microtopography controls of carbon and related elements distribution in the West Siberian frozen bogs // *Geosciences*. 2019. V. 7. P. 291. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070291>
48. Monhonval A., Strauss J., Mauclet E., Hirst C., Bemelmans N., Grosse G., Schirmermeister L., Fuchs M., Opefegelt S. Iron redistribution upon thermokarst processes in the Yedoma domain // *Frontiers Earth Sci.* 2021. V. 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.703339>
49. Morgalev Y.N., Lushchaeva I.V., Morgaleva T.G., Kolesnichenko, L.G., Loiko S.V., Krickov, I.V., Lim A.G. et al. Bacteria primarily metabolize at the active layer/permafrost border in the peat core from a permafrost region in western Siberia // *Polar Biology*. 2017. V. 40. P. 1645–16597. <https://doi.org/10.1007/s00300-017-2088-1>
50. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Shirokova L.S. Organic and organo-mineral colloids in discontinuous permafrost zone // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2016. V. 188. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.05.035>
51. Polyakov V., Orlova K., Abakumov E. Evaluation of carbon stocks in the soils of Lena River Delta on the basis of application of “dry combustion” and Tyurin’s methods of carbon determination // *Biological Communications*. 2017. V. 62. P. 67–72. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu03.2017.202>
52. Pratte S., Bao K., Shen J., Mackenzie L., Klamt A., Wang G., Xing W. Recent atmospheric metal deposition in peatlands of northeast China: A review // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 626. P. 1284–1294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.183>
53. Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhskiy S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. Dissolved organic carbon and major and trace elements in peat porewater of sporadic, discontinuous, and continuous permafrost zones of western Siberia // *Biogeosciences*. 2017. № 14. P. 3561–3584. <https://doi.org/10.5194/bg-14-3561-2017>
54. Rosca C., Schoenberg R., Tomlinson E.L., Kamber B.S. Combined zinc-lead isotope and trace-metal assessment of recent atmospheric pollution sources recorded in Irish peatlands // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 658. P. 234–249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.049>
55. Sokolov D.A., Ivanova I.S., Siromlya T.I., Soldatova E.A., Kolubaeva Yu.V. Elemental composition of the oligotrophic peat soils in Yamalo-Nenets autonomous district (Western Siberia) // *WSPCC-2021. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 1093. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1093/1/012001>
56. Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in Western Siberia: effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage // *Appl. Geochem.* 2015. V. 53. P. 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.004>
57. Vasilevich R., Vasilevich M., Lodygin E., Abakumov E. Geochemical characteristics of the vertical distribution of heavy metals in the hummocky peatlands of the cryolithozone // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023. V. 20. P. 3847. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053847>
58. Vasilevich R.S. Major and trace element compositions of hummocky frozen peatlands in the forest–tundra of Northeastern European Russia // *Geochem. Int.* 2018. V. 56. P. 1158–1172. <https://doi.org/10.1134/S0016702918100129>

Content and Mobility Metals in Oligotrophic Peat Soils of the Cryolithozone of Western Siberia

D. A. Sokolov^{1, 2, *}, I. S. Ivanova², and T. I. Siromlya¹

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia*

²*Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Tomsk, 634055 Russia*

**e-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru*

The ongoing climatic changes have the greatest impact on natural ecosystems in high-latitude areas, as warming climate, as well as increasing anthropogenic load associated with the development of Arctic zone, contribute to the degradation of frozen peatlands and an increase in the thickness of seasonally thawed layer of soil. The relevance of studying peat oligotrophic soils (Cryic Histosols) of the northern territories of Western Siberia is associated with the fact that their degradation enriches natural waters by organomineral substances, which containing a large number of chemical elements, including heavy metals, contributing to changes in the hydrogeochemical properties of natural waters of the North. The article describes the main properties of peats sampled from different horizons of soil profiles laid down at key areas covering the territory of YNAO from north to south and from west to east. The chemical composition of soils was analyzed at the IPA SB RAS using standard methods. The concentrations of gross and mobile forms of metals (Fe, Ca, K, Na, Mg, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) were investigated by optical atomic emission spectrometry and flame atomic absorption spectrometry, respectively. It has been determined that a characteristic feature of the distribution of concentrations of chemical elements in peat oligotrophic soils of the northern part of Western Siberia is the presence of two maxima within the soil profile. The first is confined to the upper horizons showing signs of degradation, while the second is confined to the upper part of the permafrost. Statistical analysis using principal component method showed that low ash content, pH and C/N ratio are associated with high mobility of K, Cu, Zn and Mg. The mobility of Fe, Mn, Pb, Cd, and Cr is associated with an increase in ash content, pH, and N_{total} in the upper part of permafrost organogenic rocks.

Keywords: peat, Arctica, major and trace elements, heavy metals, mobility of elements in soils, migration, Cryic Histosols, permafrost, residual eutrophicity