

Е. А. Романенко, Д. В. Московченко, А. А. Кудрявцев, Г. Н. Шигабаева

**ПОДВИЖНЫЕ ФОРМЫ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ
НАДЫМ-ПУРОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ
(ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)**

E. A. Romanenko, D. V. Moskovchenko, A. A. Kudryavtsev, G. N. Shigabaeva

MOBILE FORMS OF METALS IN SOILS IN THE NADYMPUR INTERFLUVE (WESTERN SIBERIA)

Аннотация. В почвах Надым-Пуровского междуречья, на северном пределе таежной зоны, проведено изучение валового содержания металлов (Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, Sr) и количества их подвижных форм, извлекаемых ацетат-аммонийным буферным раствором (pH = 4,8). Определение содержания тяжелых металлов было проведено в 55 фоновых образцах почв и в 25 пирогенных. Валовое содержание определялось на спектрометре «СПЕКТРОСКАН МАКС-GV» с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Подвижные формы металлов были определены на атомно-абсорбционном спектрометре ContrAA 700 пламенным и электротермическим методами. Статистические данные вычислены с использованием пакета программ Excel. В результате исследования подтверждено слабое накопление металлов в почвах северных районов Западной Сибири. Валовое содержание – ниже почвенного кларка для Fe в 5 раз, Mn – в 3 раза, Sr – в 2 раза, Cr – в 1,4 раза. Содержание подвижных форм варьирует в широких пределах в зависимости от количества органического вещества. Доля подвижных форм металлов от валового содержания составила: Cr – 0,84%, Fe – 1,2%, Sr – 3,8%, Mn – 8,7%, Ni – 15%. В профиле подзолов распределение подвижных форм металлов имеет элювиально-иллювиальный характер. В поверхностных органогенных горизонтах интенсивно накапливаются Mn и Sr, содержание Fe возрастает в горизонте BF. Минимальные значения отмечены в горизонте E. В пирогенных почвах происходит увеличение содержания подвижных форм металлов вследствие поступления золы. Содержание подвижных форм металлов в подавляющем большинстве случаев не превышает установленных ПДК.

Ключевые слова: Западная Сибирь; почвы; металлы; подвижные формы; подзолы.

Abstract. The total concentrations of metals (Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, Sr) and their mobile forms extracted by an ammonium acetate buffer (pH = 4,8) were studied in soils samples collected from Nadym-Pur interfluve (West Siberia), near the northern limit of the taiga zone. The heavy metal content was determined in 55 background soil samples and in 25 pyrogenic ones. Gross content was determined on a spectrometer "SPECTROSCAN MAX-GV" using x-ray fluorescence analysis. Mobile forms of metals were determined on a ContrAA 700 atomic absorption spectrometer by flame and electrothermal methods. The statistics are calculated using the Excel software package. The study confirmed the weak accumulation of metals in the soils of the northern regions of Western Siberia. The total content below the soil world average for Fe is 5 times, Mn – 3 times, Sr – 2 times, Cr – 1,4 times. The content of mobile forms varies widely depending on the amount of organic matter. The percentage of mobile forms of metals from the total content was: Cr – 0.84%, Fe – 1,2%, Sr – 3,8%, Mn – 8,7%, Ni – 15%. In the profile of podzols, the distribution of mobile forms of metals has an eluvial-illuvial character. Mn and Sr accumulate intensively in the surface organogenic horizons, and the Fe content increases in the BF horizon. Minimum values are marked in horizon E. In pyrogenic soils, there is an increase in the content of mobile forms of metals due to the intake of ash. Metal content usually not exceeded the maximal permissible concentrations for soils.

Key words: Western Siberia; soils; metals; mobile forms; podzols.

Сведения об авторах: Романенко Елизавета Ахмедовна, ORCID: 0000-0003-2964-1226, Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень, Россия, leta-92@list.ru; Московченко Дмитрий Валерьевич, ORCID: 0000-0001-6338-7669, д-р геогр. наук, Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень, Россия, moskovchenko1965@gmail.com; Кудрявцев Александр Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, государственный аграрный университет Северного Зауралья, г. Тюмень, Россия, kudrphys@mail.ru; Шигабаева Гульнара Нурчаллаевна, канд. техн. наук, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия, g.n.shigabaeva@utmn.ru.

About the authors: Romanenko Elizaveta Akhmedovna, ORCID: 0000-0003-2964-1226, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia, leta-92@list.ru; Moskovchenko Dmitry Valerievich, ORCID: 0000-0001-6338-7669, Dr. habil., Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia, moskovchenko1965@gmail.com; Kudryavtsev Alexander Alekseevich, Ph.D., Agrarian State University of Northern Trans-Urals, Tyumen, Russia, kudrphys@mail.ru; Shigabaeva Gulnara Nurchallaevna, Ph.D., Tyumen State University, Tyumen, Russia, g.n.shigabaeva@utmn.ru.

Введение

Обязательным условием сбалансированного природопользования в полярных и приполярных районах Западной Сибири является проведение импактного мониторинга природной среды. Одним из важнейших объектов мониторинга являются почвы, накапливающие поллютанты и являющиеся центральным звеном биогеохимического круговорота элементов. В предшествующих исследованиях российских и зарубежных ученых было выявлено, что на территории ЯНАО в ходе геологоразведочных работ, разработки месторождений углеводородов и иных полезных ископаемых в природную среду поступают тяжелые металлы [13; 18; 20; 25]. Даже при низкой концентрации тяжелых металлов в почвах вследствие интенсивной биогенной и водной миграции возможно превышение нормативов их содержания в живых организмах. К примеру, при низком уровне содержания ртути и кадмия в почвах ЯНАО отмечено накопление этих элементов в растениях и высокое содержание в органах и тканях северного оленя [1]. Обнаружено повышенное содержание ряда микроэлементов (Ag, Zn, Se Hg, Pb, V, Bi) в биосубстратах коренного населения ЯНАО [2].

Актуальность проблемы определила значительное число исследований биогеохимических свойств почв ЯНАО, проведенных в последние годы. В частности, определены главные закономерности содержания металлов и металлоидов в разных типах почв и почвенных горизонтах [13; 18; 20; 22]. Однако предметом указанных исследований являлась оценка валового содержания металлов, в то время как экологическая опасность проистекает, прежде всего, от их подвижных форм, которые способны переходить в растения, а из них – в животных и человека. Поэтому содержание в почве подвижных форм тяжелых металлов – важнейший показатель, характеризующий санитарно-гигиеническую обстановку. Содержание подвижных форм металлов также характеризует ряд почвенно-экологических условий. В частности, доказана зависимость подвижности металлов от увлажненности почвы [5]. Определение количества подвижных форм металлов в почвах является важной геоэкологической задачей, поскольку дает основу для корректного проведения эколого-геохимического мониторинга, обязательного на месторождениях углеводородов.

Цель данного исследования – выявить закономерности распределения подвижных форм тяжелых металлов в почвах приполярных районов ЯНАО, включая фоновые ненарушенные почвы и их пирогенные модификации. В лесотундре и северной тайге Западной Сибири природные пожары являются одним из важнейших факторов преобразования экосистем. Современные климатические изменения и техногенное воздействие приводят к их учащению. Показано, что на Уренгойском месторождении четверть территорий подвергалась влиянию пожаров [12]. Учитывая широкое распространение гарей, исследование эколого-геохимического статуса почв на участках разработки месторождений углеводородов должно учитывать и влияние пожарного фактора.

Материалы и методы исследования

Отбор проб выполнен в летний период 2018 г. на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, на участке пос. Пангоды – пос. Правохеттинский и примерно в 40 км к югу от Надыма (рис. 1). Территория находится на северном пределе таежной зоны. Согласно почвенно-географическому районированию объекты исследований расположены на границе полярной и таежно-лесной почвенных областей [9]. В качестве литогенной основы ландшафта выступают аллювиально-морские отложения четвертой морской террасы (am^4_{III}), морские и ледово-морские отложения (m , gm_{II}) и плейстоцен-голоценовые отложения первой надпойменной террасы (a^1_{III-IV}) [3]. По гранулометрическому составу почвообразующие породы и почвы – песчаные и супесчаные. Растительный покров представлен редкостойными лиственничными и березово-лиственничными кустарничково-лишайниковыми лесами, олиготрофными ерниково-кустарничково-сфагновыми болотами. Крупные пожары на этой территории регистрировались в 2016 г.

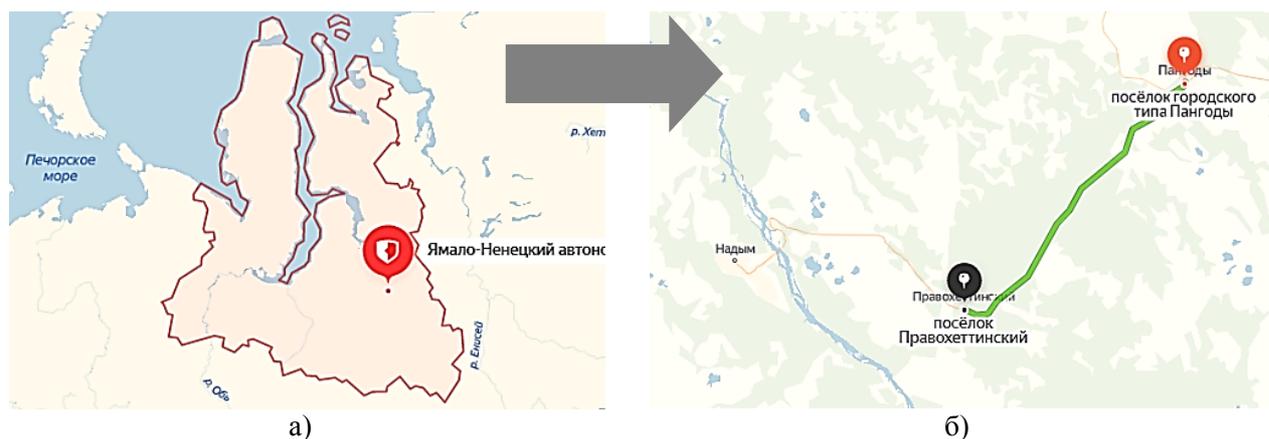


Рис. 1. Район исследований (а) и участки опробования (б)

Наиболее широко изучены представленные в структуре почвенного покрова иллювиально-железистые подзолы (Albic Podzols согласно WRB), набор генетических горизонтов O-E-BF-BC-C. Почвы гарей были диагностированы как подзолы иллювиально-железистые пирогенные (Oao_{руг}-E-BF-BC-C). Также обследованы торфяные олиготрофные мерзлые почвы (Hemic Cryic Histosols) (O-TO-TT₁). Отбор проб был проведен из генетических горизонтов в пределах сезонноталого слоя, мощность которого варьировала от 35 см в торфяных почвах до > 1 в подзолах.

В лабораторных условиях пробы почв были высушены, просеяны через сито с диаметром ячеей 1 мм для удаления корней растений. В отобранных образцах было определено валовое содержание металлов и количество подвижных форм. Для определения валового содержания элементов использовался рентгенофлуоресцентный анализатор «СПЕКТРОСКАН МАКС-GV» (методика 242/18-2010). Стандартная навеска составляла 2 г. Анализ включал два параллельных определения в каждой пробе, после чего результаты проверялись на предмет расхождений с допусками ($P = 0,95$), рассчитанными для каждого элемента. Если результаты испытания были удовлетворительными, то в качестве результата измерения принималось среднее арифметическое. Репрезентативность обеспечивали калибровкой с помощью комплекта Государственных стандартных образцов состава почв. Анализ проведен в центре коллективного пользования Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (г. Пушкино).

Для определения подвижных форм металлов (Cr, Ni, Cu, Fe, Mn) использовали навеску массой 5 г, которую обрабатывали ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 по методике ЦИНАО (1992). Определение подвижных форм металлов осуществлялось в Институте химии Тюменского государственного университета на атомно-абсорбционном спектрометре ContrAA 700. Пламенным методом определены данные от десятитысячных долей процента до десятков массовых процентов; с помощью электротермического метода – от 10^{-6} – 10^{-4} % массовых процентов до диапазона пламенных определений. Всего было исследовано содержание металлов в 55 пробах фоновых почв и 25 – в их пирогенных модификациях. Также в почвах определены величина pH солевой вытяжки, зольность и содержание органического вещества по Тюрину.

При анализе результатов мы использовали методический прием деления почвенных горизонтов на органогенные (поверхностные) и минеральные (срединные), использованный в ряде работ, нацеленный на изучение закономерностей элементного состава почв полярных территорий [20]. Полученные результаты были сгруппированы в выборки по органогенным и минеральным горизонтам, фоновым и пирогенным почвам и подсчитаны статистические показатели – среднеарифметическое значение концентраций элементов (M), медианное значение (Me) и среднеквадратичное отклонение (SD). Вычисление проводилось с использованием пакета программ Excel. Экологическое состояние и биогеохимический статус почв оценивали путем сравнения с установленными ПДК (ГН 2.1.7.2041-06), пороговыми границами содержания элементов в почвах [11], почвенными кларками по A. Kabata-Pendias [26] и кларками земной коры [7]. Была вычислена доля подвижных форм металлов от валового содержания, проведено сопоставление с литературными данными о содержании подвижных форм металлов в почвах сопредельных регионов.

Результаты и обсуждение

Почвы имеют сильноокислую, реже кислую реакцию. Величина $pH_{\text{сол}}$ изменяется в пределах 2,67–4,89. Наиболее кислыми являются поверхностные органогенные горизонты, в нижней части профиля величина pH увеличивается. Кислая реакция почв тундры и лесотундры Западной Сибири неоднократно отмечалась различными авторами [4; 13]. В условиях низких температур и избыточного увлажнения трансформация растительных остатков приводит к образованию подвижных органических кислот, которые способны глубоко проникать в минеральную толщу коры выветривания и почв [24]. Низкие значения pH вызваны малым количеством оснований в песчаных почвах и бедностью кальцием почвообразующих пород. Среднее содержание Са составило в обследованных почвах 0,31%, что более чем на порядок меньше кларка Са в верхней части земной коры, составляющего, по Н.А. Григорьеву (2009), 3,89% [7]. Важное следствие закисления – высокая подвижность большинства металлов в почвах.

Для обследованных почв характерно широкое варьирования показателей зольности и содержания гигровлаги, поскольку были опробованы различные генетические горизонты, как минеральные, так и органогенные. Содержание гигровлаги в органогенных горизонтах выше, чем в минеральных, и в большинстве разрезов падает с глубиной. Зольность срединных минеральных горизонтов низкая и в среднем составляет 2,2%, органогенных поверхностных горизонтов – 28%.

Результаты определения валового содержания и количества подвижных форм металлов в почвах, а также показатели pH , зольности и содержания гигровлаги представлены в таблице 1.

Таблица 1

Статистические показатели физико-химических параметров и содержания металлов в почвах Надым-Пуровского междуречья

Показатели	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Min–Max</i>	<i>Me</i>	ПДК* или кларк почв**
Зольность, %	13,1	18,8	0,5–86	3,8	–
Гигровлага, %	1,7	2,0	0,2–8,2	0,80	–
$pH_{\text{сол}}$	3,67	0,63	2,67–4,89	3,64	–
$Cu_{\text{подв.}}$, мг/кг	0,76	1,03	0,0–4,1	0,23	3,0*
$Fe_{\text{подв.}}$, мг/кг	118,2	199,1	4,8–1115	40,0	–
$Mn_{\text{подв.}}$, мг/кг	15,5	31,2	0,1–188,2	5,2	60*
$Ni_{\text{подв.}}$, мг/кг	1,26	1,01	0,0–4,2	1,17	4,0*
$Cr_{\text{подв.}}$, мг/кг	0,46	0,50	0,0–2,1	0,28	6,0*
$Sr_{\text{подв.}}$, мг/кг	4,52	5,68	0,0–29,9	2,88	–
$Fe_{\text{вал.}}$, мг/кг	8233	5532	2057–21115	7563	–
$Mn_{\text{вал.}}$, мг/кг	158,3	106,6	24,2–533,1	141,6	488**
$Ni_{\text{вал.}}$, мг/кг	5,99	4,74	0,0–18,3	5,24	29**
$Cr_{\text{вал.}}$, мг/кг	43,5	19,6	16,4–83,5	36,9	59,5**
$Sr_{\text{вал.}}$, мг/кг	89,2	41,0	19,8–161,5	83,4	175**

Примечание: содержание $Cu_{\text{вал.}}$ было ниже порога обнаружения. Величина ПДК для подвижных форм (ГН 2.1.7.2041-06), кларка почв (Kabata-Pendias 2011) – для валового содержания.

Сопоставление валового содержания металлов в обследованных почвах с величиной кларка верхней части земной коры по Н.А. Григорьеву (2009), кларка почв по А. Кабата-Пендиас (2011) [7; 25] и с пороговыми величинами, лимитирующими благоприятные условия развития живых организмов по А. П. Ковальскому (1970) [11], показывает, что биогеохимическая ситуация характеризуется дефицитом железа и всех микроэлементов.

Согласно схеме биогеохимического районирования В.В. Ковальского (1970), территория севера Западной Сибири отнесена к таежно-лесной биогеохимической зоне, основными свойствами которой являются недостаток кальция, фосфора, калия, кобальта, меди, йода, молибдена, бора, цинка и избыток стронция. Полученные нами результаты подтверждают существенный дефицит меди, валовое содержание которой в обследованных пробах почв было ниже порога обнаружения. Содержание марганца в большинстве проб было ниже пороговой границы, составляющей 400 мг/кг [11].

Валовое содержание железа в обследованных фоновых почвах варьировало от 2057 до 21115 мг/кг (табл. 1). В соответствии с градацией почв по содержанию Fe [5] обследованные почвы относятся к категориям «умеренно низкой», «низкой» и «очень низкой» ожелезненности. Валовое

вое содержание микроэлементов ниже почвенного кларка для Ni – приблизительно в 5 раз, Mn – в 3 раза, Sr – в 2 раза, Cr – в 1,4 раза (табл. 1). По величине кларка концентрации (по отношению к кларку земной коры) элементы ранжируются следующим образом: Cr 0,47 > Sr 0,33 > Mn 0,21 > Fe 0,2 > Ni 0,12. Таким образом, для почв характерен отчетливо выраженный дефицит микроэлементов и железа. Низкое содержание микроэлементов, которые имеют кларки концентраций <1, является общим свойством коры выветривания и почв арктических районов. Концентрации элементов в обследованных почвах близки к региональным фоновым величинам содержания металлов в почвах Надым-Пур-Тазовского региона, приводимых в работе [20] (рис. 2). Только содержание Cr несколько выше приводимых в указанной работе значений. Полученные результаты подтверждают вывод, что почвы Надым-Пур-Тазовского региона характеризуются содержанием тяжелых металлов в 3–9 раз ниже величины кларка и значительным разбросом значений [14].

Для подвижных форм также характерен дефицит химических элементов. Среднее содержание $Mn_{\text{подв}}$ составило 15,5 мг/кг, что значительно меньше значений, приводимых в литературных источниках для сопредельных территорий. В почвах поймы Оби содержание $Mn_{\text{подв}}$ варьирует от 32,6 до 69,7 мг/кг [10], в почвах ХМАО среднее содержание $Mn_{\text{подв}}$ составляет 24,9 мг/кг в минеральных и 42,3 мг/кг в органогенных горизонтах [18]. Содержание $Cr_{\text{подв}}$ (0,46 мг/кг) в обследованных почвах меньше значений, типичных для почв ХМАО – Югры (0,62–0,66 мг/кг) [19]. Однако концентрации $Cu_{\text{подв}}$ и $Ni_{\text{подв}}$ выше, чем в почвах более южных районов. Так, среднее содержание подвижных форм меди в почвах Надым-Пуровского междуречья (0,76 мг/кг) больше, чем среднее значение содержания $Cu_{\text{подв}}$ в почвах ХМАО – Югры (0,44 мг/кг) [19].

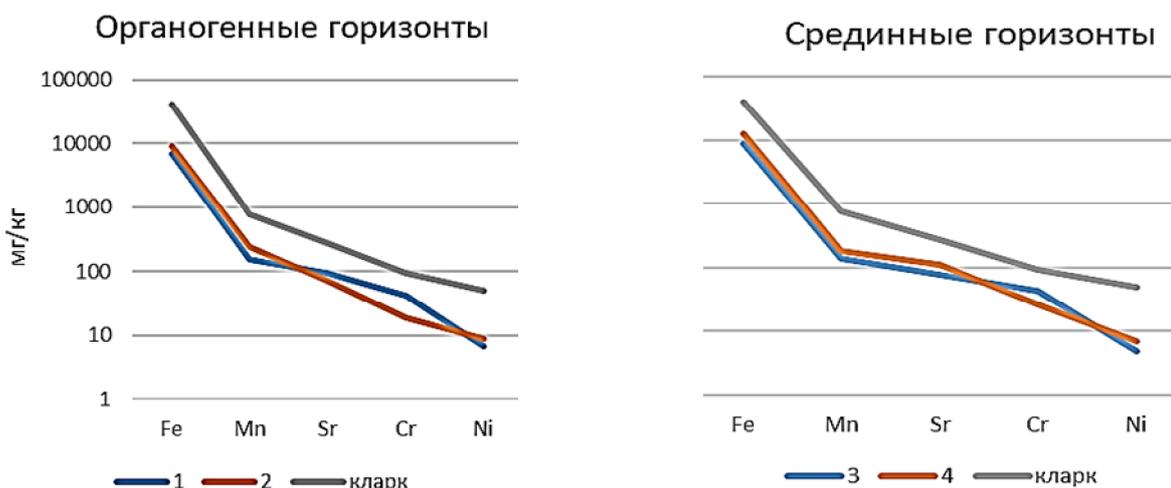


Рис. 2. Валовое содержание химических элементов в почвах Надым-Пуровского междуречья:
 1 – органогенные горизонты, наши данные; 2 – региональный фон металлов в органогенных горизонтах почв Надым-Пур-Тазовского региона (Опекунова и др. 2019); 3- срединные минеральные горизонты, наши данные; 4 - региональный фон в минеральных горизонтах; кларк по верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (2009)

Варьирование подвижных форм тяжелых металлов очень значительно, особенно для Fe и Mn (168–201%), и в меньшей степени для Ni (80%), что связано с неоднородностью литогенной основы, контрастным распределением органических веществ в разных типах почв и в разных генетических горизонтах, разными физико-химическими условиями. Значительное варьирование содержания подвижных форм металлов свойственно многим почвам. Так, коэффициенты вариации для подвижных форм Ni, Cu, Zn, Cd в пирогенных торфяных почвах достигали 100–200% [15].

Доля подвижных форм металлов от валового содержания варьировала в среднем от <1 до 15%. Наименьшая доля подвижных форм отмечена для хрома (0,84%). Далее, в порядке возрастания, следуют Fe (1,2%), Sr (3,8%), Mn (8,7%), Ni (15%). Согласно данным А.И. Сысо [22], доля металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным раствором из почв юга Западной Сибири, составляет: для Cr – 0,3%, Ni – 1,2%, Mn – 12%, Cu – 0,3%. В почвах ХМАО – Югры варьирование содержания легкоподвижных форм от валового содержания, следующее [18]: Cr – 0,4–1,0%, Ni – 1–4%, Mn – 1,8–5,7%, Cu – 1–3%. В полученных нами результатах доля подвижных форм хрома совпадает с результатами для почв сопредельных регионов, но для Mn и Ni процентное отношение

доли подвижных форм существенно выше. Характерно, что повышенное количество подвижной формы Mn и Ni наблюдается при очень низком валовом содержании. Мы связываем это с высокой кислотностью обследованных почв, которая определяет повышенную подвижность металлов из-за разрушения силикатов, слабого закрепления Mn и Ni в составе гидроокислов железа. Поскольку почвы – преимущественно песчаные по гранулометрическому составу, не происходит связывание никеля иловатыми и пылеватыми частицами.

Содержание подвижных форм металлов зависит от типа почв, генетического горизонта, местоположения почвенного разреза, количества органического вещества, увлажнения и кислотности почв. Отчетливо выражены различия в физико-химических характеристиках органогенных и минеральных горизонтов. В органогенных горизонтах значительно выше содержание гигровлаги, зольности, меньше – величина pH, повышено содержание Mn и Sr (рис. 3). Содержание хрома, который слабо накапливается растениями, напротив, выше в минеральных горизонтах.

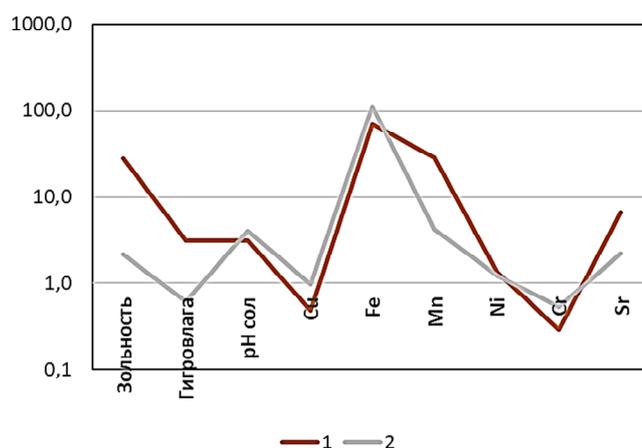


Рис. 3. Среднее содержание подвижной формы химических элементов и физико-химические параметры органогенных (1) и минеральных (2) горизонтов почв

Для Mn и Sr отмечена положительная корреляция с содержанием органического вещества и гигровлаги. При увеличении кислотности содержание Mn уменьшается, что говорит о выщелачивании этого элемента в кислой среде (табл. 2).

Распределение подвижных форм металлов в профиле подзолов обычно имеет элювиально-иллювиальный характер. Содержание Fe достигает максимальных значений в горизонте ВF, минимальные значения отмечены в горизонте E (рис. 4).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции (ранговая корреляция Спирмена) между содержанием элементов и свойствами почв

Элемент	Содержание органического вещества	Количество гигровлаги	pH _{сол.}	Элемент	Содержание органического вещества	Количество гигровлаги	pH _{сол.}
Cu	–	–	–	Ni	–	–	–
Fe	–	–	–	Cr	–	–	–
Mn	0,64	0,56	-0,55	Sr	0,48	0,50	–

Содержание марганца максимально в поверхностных горизонтах, что соответствует высоким значениям коэффициентов биологического накопления этого элемента, составляющего, по В.В Добровольскому [8; 9], в среднем 6,86, а в тундровых кустарниках превышающих 10 [17]. Повышенное содержание Mn_{подв.} в органогенных горизонтах и крайне низкое в срединных минеральных соответствует общепринятым представлениям о ведущей роли Mn в биологическом поглощении растениями таежной зоны и его высокой подвижности в гумидных ландшафтах [21]. Сходное распределение отмечено для Cu (рис. 4). Предшествующие исследования не выявили значительных различий в распределении подвижной формы меди в органогенных и минеральных горизонтах почв ХМАО [19], аллювиальных почв Оби [10], торфяных и торфяных глеевых почв [15]. Отмеченные различия содержания Cu_{подв.} в обследованных нами почвах связаны с биологическим

накоплением меди тундровыми растениями, аккумуляцией в поверхностном горизонте и иллюви-рованием в составе металлоорганических комплексов.

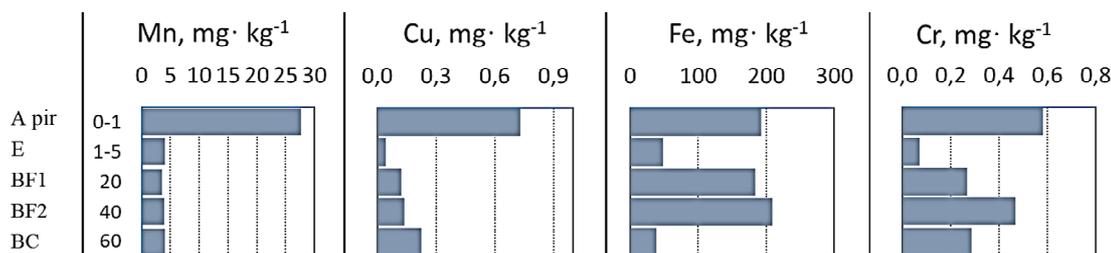


Рис. 4. Распределение элементов в генетических горизонтах пирогенного иллювиально-железистого подзола

Содержание подвижных форм металлов в подавляющем большинстве не превышает установленные ПДК. Превышение ПДК меди было дважды отмечено в одном почвенном разрезе, что связано с литогенным фактором, поскольку во всех горизонтах, включая BC и C, содержание $Cu_{\text{подв}}$ существенно превышает средние величины. Превышение ПДК марганца было зафиксировано дважды, причем оба случая отмечены в поверхностных горизонтах, что объясняется интенсивным биологическим накоплением этого элемента. Только в одной пробе было отмечено незначительное (в 1,1 раза) превышение ПДК никеля. Проба была отобрана в сосновом лишайниковом редкостойном лесу в 40 км южнее г. Надым на участке старого (≈ 50 лет) пожара из горизонта $A_{\text{руг}}$. Техногенные объекты – источники выбросов Ni – в ближайшем окружении отсутствуют. Другие пробы из этого участка также характеризуются повышенным содержанием Ni (1,54–3,2 мг/кг). Валовое содержание Ni в них невелико, однако реакция почвенных растворов сильноокислая (pH = 2,9–3,1), что дает основания для вывода об активном выщелачивании в сильноокислых условиях и последующем закреплении подвижных форм в составе металлоорганических комплексов.

Отдельного рассмотрения заслуживает влияние пирогенного фактора. Проведено сопоставление состава поверхностных (0–5 см) горизонтов подзолов на постпирогенных и контрольных участках. Результаты, представленные в таблице 3, показывают, что в пирогенных почвах снижается количество гигроулаги, уменьшается зольность, незначительно увеличивается pH за счет поступления золы. В то же время общее содержание органики снижается из-за выгорания углерода. Наблюдается рост содержания подвижной формы металлов (Fe, Cr, Mn Cu, Sr), что связано с поступлением золы, в которой происходит концентрирование элементов после выгорания органической составляющей. Исключением является Ni, содержание которого на участках недавних пожаров минимально и увеличивается по мере восстановления растительности.

Таблица 3

Зольность, pH и содержание подвижной формы металлов в пирогенных почвах

Давность пожара, годы	Зольность, %	pH _{сол.}	$Cu_{\text{подв}}$, мг/кг	$Fe_{\text{подв}}$, мг/кг	$Mn_{\text{подв}}$, мг/кг	$Ni_{\text{подв}}$, мг/кг	$Cr_{\text{подв}}$, мг/кг	$Sr_{\text{подв}}$, мг/кг
1–2	35,1	3,15	0,60	159,3	26,8	0,72	0,66	7,5
7–12	19,4	3,07	0,56	64,4	16,1	0,99	0,29	8,7
35 и более	22,0	2,97	0,13	34,2	15,9	3,02	0,02	2,3

Выводы

Полученные результаты подтверждают устоявшееся мнение о низком содержании микроэлементов и железа в почвах полярных и приполярных районов. Валовое содержание микроэлементов ниже кларка для Ni – в 5 раз, Mn – в 3 раза, Sr – в 2 раза, Cr – в 1,4 раз. Обеднение почв связано с активным выщелачиванием и выносом элементов в условиях кислой реакции среды.

Сравнение с приводимыми в литературе данными о содержании подвижных форм металлов в почвах сопредельных районов Западной Сибири показывает, что в Надым-Пуровском междуречье на песчаных породах почвы содержат меньше подвижных форм Mn и Cr, содержание Ni и Cu, напротив, повышено. Варьирование содержания подвижных форм тяжелых металлов значительно, особенно для Fe и Mn (168–201%), и в меньшей степени для Ni (80%), что связано с неоднородностью литогенной основы, контрастным распределением органических веществ в разных типах почв и в разных генетических горизонтах, разными физико-химическими условиями. В подзолах

максимальное содержание подвижных форм наблюдается в поверхностном органоминеральном горизонте, минимальное – в горизонте Е. В пирогенных почвах происходит увеличение содержания подвижных форм металлов вследствие поступления золы.

*Работа выполнена по программе исследований Тюменского научного центра СО РАН,
проект АААА-А17-1117050-4000146-5.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Агбалиян Е. В., Листищенко А. А. Накопление поллютантов (ртути и кадмия) в почве, растениях и организме животных // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2017. № 3 (96), С. 4–10.
2. Агбалиян 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>
3. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: ФГУП Омская картографическая фабрика, 2004.
4. Васильевская В. Д., Иванов В. В., Богатырев Л. Г. Почвы севера Западной Сибири. М., 1986.
5. Водяницкий Ю. Н., Смагин А. В., Яковлев А. С. Факторы изменчивости содержания подвижных форм тяжелых металлов в почве // Экологический вестник Северного Кавказа. 2016. Т. 12. № 1. С. 27–38.
6. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006.
7. Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург, 2009. 383 с.
8. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003.
9. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М., 2004.
10. Изерская Л. А., Воробьева Т. Е. Формы соединений тяжелых металлов в аллювиальных почвах Средней Оби // Почвоведение. 2000. № 1. С. 56–62.
11. Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 1970.
12. Корниенко С. Г. Оценка влияния разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения на состояние территории лесотундры по данным ИСЗ Landsat // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 78–87.
13. Кукушкин С. Ю. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы при освоении нефтегазоконденсатных месторождений севера Западной Сибири: Дис. канд. геогр. наук. СПб. 2016.
14. Кукушкин С. Ю., Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю., Арестова И. Ю. Тяжелые металлы в почвах Надым-Пур-Тазовского региона // Почвы и земельные ресурсы: современное состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование. 2018. С. 258–262.
15. Липатов Д. Н., Щеглов А. И., Манахов Д. В., Брехов П. Т. Пространственная неоднородность свойств торфяных почв верховых болот в условиях локального пирогенеза на северо-востоке острова Сахалин // Почвоведение. 2016. № 2. С. 261–274. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16020076>
16. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992.
17. Московченко Д. В. Биогеохимические особенности ландшафтов полуострова Ямал и их оптимизация в связи с нефтегазодобычей: Автореф. дис. канд. геогр. наук. СПб. 1995.
18. Московченко Д. В. Экогеохимия нефтедобывающих районов Западной Сибири. Новосибирск: ГЕО, 2013.
19. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Фоновое содержание подвижных форм металлов в почвах севера Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2015. Т. 1. № 3(3), С. 163–174.
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. Перельман А. И. Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999.
22. Томашунас В. М., Абакумов Е. В. Содержание тяжелых металлов в почвах полуострова Ямал и острова Белый // Гигиена и санитария. 2014. № 6. С. 26–31.
23. Сысо А. И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.
24. Таргульян В. О. Почвенно-геохимическое районирование холодно-влажных областей севера Евразии // Растительность лесотундры и пути ее освоения. Л.: Наука, 1967. С. 13–19.

25. 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. 2019. V. 76. № 4. P. 540–553. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00607-y>

26. Trace Elements in Soils and Plants. 4th edition. By A. Kabata-Pendias. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor, Francis Group. 2010. P. 548. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000743>

27. WRB I. Working Group.(2014). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, Italy.

REFERENCES

1. Agbalyan, E. V., Listishenko, A. A. (2017). Accumulation of pollutants (mercury and cadmium) in soil, plants and animals. *Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous district*, 3(96), 4-10. (in Russian)

2. Agbalyan, E. V., Shinkaruk, E. V., Popova, T. L., & Maksimenko, Yu. I. (2019). Ecological and geochemical situation on the territory of the Yamalo-Nenets Autonomous district based on the materials of elemental analysis of biological environments (hair) of the population. *Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous district*, 2(103), 34-40. (in Russian). <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.103.2.004>

3. Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga (2004). FGUP Omskaya kartograficheskaya fabrika. (in Russian).

4. Vasil'evskaya, V. D., Ivanov, V. V., & Bogatyrev, L. G. (1986). Pochvy severa Zapadnoi Sibiri. Moscow. (in Russian).

5. Vodyanitsky, Yu. N., Smagin, A. V., & Yakovlev, A. S. (2016). Variation factors of mobile forms of heavy metals in soil. *The North Caucasus Ecological Herald*, 12(1), 27-38. (in Russian).

6. GN 2.1.7.2041-06. (2006). Predel'no-dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve: Gigenicheskie normativy. Moscow. (in Russian).

7. Grigoriev, N. A. (2009). Raspreделение khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinental'noi kory. Ekaterinburg. (in Russian).

8. Dobrovolsky, G. V. (2003). Osnovy biogeokhimii. Moscow. (in Russian).

9. Dobrovolsky, G. V., & Urusevskaya, I. S. (2004). Geografiya pochv. Moscow. (in Russian).

10. Izerskaya L. A., Vorobyova T. E. (2000). Formy soedinenii tyazhelykh metallov v allyuvial'nykh pochvakh Srednei Obi. *Pochvovedenie*, (1). 56-62. (in Russian).

11. Kovalsky, V. V., & Andrianova, G. A. (1970). Mikroelementy v pochvakh SSSR. Moscow. (in Russian).

12. Kornienko, S. G. (2009). Estimation of Urengoy's Oil and Gas Deposit Mining Impact on a Condition of Forest Tundra Landscape Using Landsat Data. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics Earth Observation and Remote Sensing*, (4). 78–87. (in Russian).

13. Kukushkin, S. Yu. (2016). Indikatory antropogennoi nagruzki na prirodno-territorial'nye komplekсы pri osvoenii neftegazokondensatnykh mestorozhdenii severa Zapadnoi Sibiri: Dis. kand. geogr. nauk. St. Petersburg. (in Russian).

14. Kukushkin, S. Yu., Opekunova, M. G., Opekunov, A. Yu., & Arestova, I. Yu. (2018). Tyazhelye metally v pochvakh Nadym-Pur-Tazovskogo regiona. In *Pochvy i zemel'nye resursy: sovremennoe sostoyanie, problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya, geoinformatsionnoe kartografirovaniye*, Minsk. 258-262. (in Russian).

15. Lipatov, D. N., Shcheglov, A. I., Manakhov, D. V., & Brekhov, P. T. (2016). Spatial Heterogeneity in the Properties of High-Moor Peat Soils under Local Pyrogenesis in Northeastern Sakhalin. *Eurasian Soil Science*, 49(2). 238-250. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0032180X16020076>

16. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodii i produktsii rastenievodstva (1992). Moscow. (in Russian).

17. Moskovchenko, D. V. (1995). Biogeokhimicheskie osobennosti landshaftov poluostrova Yamal i ikh optimizatsiya v svyazi s neftegazodobychei: Avtoref. dis. kand. geogr. nauk. St. Petersburg. (in Russian).

18. Moskovchenko, D. V. (2013). Ekogeokhimiya neftedobyvayushchikh raionov Zapadnoi Sibiri. Novosibirsk. (in Russian).

19. Moskovchenko, D. V., & Babushkin, A. G. (2015). Background level of mobile forms of metals in soils of Northwest Siberia. *Bulletin of the Tyumen state University. Ecology and environmental management*, 1(3(3)), 163-174. (in Russian).

20. Opekunova, M. G., Opekunov, A. Y., Kukushkin, S. Y., & Ganul, A. G. (2019). Background Contents of Heavy Metals in Soils and Bottom Sediments in the North of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 52(4). 380-395. (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>

21. Perelman, A. I., & Kasimov, N. S. (1999). Geokhimiya landshafta. Moscow. (in Russian)

22. Tomashunas, V.M., & Abakumov, E. V.(2014). The content of heavy metals in soils of the Yamal peninsula and the Bely Island. *Hygiene and Sanitation, Russian Journal*, (6), 26-31. (in Russian)

23. Syso, A. I. (2007). Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoi Sibiri. Novosibirsk. (in Russian).
24. Targulyan, V. O. (1967). Pochvenno-geokhimicheskoe raionirovanie kholodno-vlazhnykh oblastei severa Evrazii. In *Rastitel'nost' lesotundry i puti ee osvoeniya*, Leningrad. 13-19. (in Russian).
25. Ji, X., Abakumov, E., Antcibor, I., Tomashunas, V., Knoblauch, C., Zubzycki, S., & Pfeiffer, E. M. (2019). 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*, 76(4), 540-553. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00607-y>
26. Trace Elements in Soils and Plants. 4th edition. By A. Kabata-Pendias. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group (2010). 548. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000743>
27. WRB, I. Working Group. (2014). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, Italy.

Романенко Е. А., Московченко Д. В., Кудрявцев А. А., Шигабаева Г. Н. Подвижные формы металлов в почвах Надым-Пуровского междуречья (Западная Сибирь) // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2020. № 2. С. 136–145. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/20-2/18>

Romanenko, E. A., Moskovchenko, D. V., Kudryavtsev, A. A., & Shigabaeva, G. N. (2020). Mobile forms of metals in soils in the Nadym-Pur interfluve (Western Siberia). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, (2). 136–145. (In Russian) <https://doi.org/10.36906/2311-4444/20-2/18>

дата поступления: 03 февраля 2020 г.

дата принятия: 25 апреля 2020 г.

© Романенко Е.А., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А., Шигабаева Г.Н.