

УДК 631.42+581.5:550.47

ФОНОВОЕ СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ И ДОННЫХ ОСАДКАХ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2019 г. М. Г. Опекунова¹ *, А. Ю. Опекунов¹, С. Ю. Кукушкин¹, А. Г. Ганул¹¹Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199178, Санкт-Петербург, ВО 10-ая линия, 33/35

*e-mail: m.opekunova@mail.ru

Поступила в редакцию 16.03.2018 г.

После доработки 24.05.2018 г.

Принята к публикации 26.09.2018 г.

На основе результатов многолетних исследований (1993–2017 гг.) на фоновых и антропогенно-нарушенных участках добычи нефти и газа севера Западной Сибири рассчитано фоновое содержание (региональные кларки) тяжелых металлов (Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Pb, Hg, Cd, Ba, Sr, Sc) в почвах и донных отложениях. Выявлено, что почвы региона характеризуются относительно низкими природными концентрациями тяжелых металлов. Основными причинами, определяющими изменчивость химического состава компонентов природной среды, служат литологический и химический составы почвообразующих пород и зонально-азональная ландшафтно-геохимическая дифференциация, выражающаяся в интенсивности торфонакопления. На основе статистического анализа и метода ранжированных геохимических спектров обоснована необходимость определения регионального геохимического фона отдельно для органогенных горизонтов, двух минеральных (иллювиальных) горизонтов почв легкого и тяжелого гранулометрического состава, а также торфяников. Минимальные значения содержания большинства тяжелых металлов установлены в торфяниках, в которых их концентрация в 2–8 раз ниже содержания в глинистых и суглинистых иллювиальных горизонтах. Исключение составляют Hg и Cd, уровень которых в торфяниках в 3–4 раза выше, чем в иллювиальных горизонтах. В донных осадках фоновые содержания рассчитаны для трех типов, охватывающих весь гранулометрический спектр отложений: илах (торфянистых илах), илистых песках (алеюритях), а также в мелкозернистых песках. При этом среднее содержание в илах Fe и Mn в 11 раз, Ni – в 8,5, Co – в 6,5, Zn, Cu, Cr, V – в 5 раз выше, чем в мелкозернистых песках. Установленные методом ICP MS фоновые концентрации металлов рекомендованы для оценки техногенного воздействия на почвы и донные отложения при проведении экологического мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: региональный геохимический фон, нефтегазоконденсатные месторождения

DOI: 10.1134/S0032180X19020114

ВВЕДЕНИЕ

Север Западной Сибири относится к числу активно развивающихся регионов. Наряду с традиционными видами землепользования (оленоводством, охотой и рыболовством), в последние годы здесь интенсивно разрабатываются нефтегазоконденсатные месторождения, создается развернутая инфраструктура по их обустройству, строятся дороги, возводятся магистральные трубопроводы и линии электропередач, разрастаются города и поселки.

На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) сосредоточено более 70% российских и 18% мировых запасов газа. В округе открыто 236 месторождений углеводородного сырья, из которых 77 находятся в промышленной разработке, 19 месторождений подготовлены к эксплуатации. На 140 месторождениях ведутся

разведочные работы. Общая протяженность магистральных трубопроводов в округе составляет около 9 тыс. км, а суммарная проектная пропускная способность – около 600 млрд м³ газа в год. В настоящее время основная добыча углеводородного сырья осуществляется в Надым-Пур-Тазовской нефтегазоносной области, здесь действуют 6 предприятий нефтегазоперерабатывающей отрасли. При этом ЯНАО относится к числу высокоурбанизированных регионов России, где доля городского населения составляет около 84% [14]. Все это определяет заметный уровень техногенного воздействия на компоненты ландшафта. Доля выбросов загрязняющих веществ предприятиями, непосредственно относящимися к топливно-энергетическому комплексу (добыча горючих полезных ископаемых, производство нефтепродуктов, транспортировка по трубопро-

водам нефти, нефтепродуктов, газа и продуктов его переработки), в 2015 г. составила 573.535 тыс. т (2014 г. – 543.284 тыс. т) или 91% от всех выбросов округа.

В условиях загрязнения окружающей среды большое внимание уделяется изучению процессов естественной геохимической дифференциации и оценке природного фона содержания микроэлементов в почвах. Широко обсуждается вопрос о недостатках использования существующих нормативов валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) [18, 19, 24, 44], но все же установленные ПДК и ОДК остаются основными критериями оценки уровня техногенного загрязнения почв. При этом важным показателем трансформации химического состава, а также нормирования содержания микроэлементов в почвах служит определение их регионального и локального геохимического фона. Оценке фоновых содержаний ТМ в почвах и донных отложениях посвящены крупные международные и национальные проекты (Barents Region, GEMAS, DEQ, Envirolink, NGSA и др.), материалы исследований представлены в отечественных [15–18, 21, 38, 40] и зарубежных публикациях [50, 54, 57, 65–68, 73, 74]. Однако установленные для севера Западной Сибири и сопредельных регионов данные либо малочисленны [15], либо расчеты проведены по результатам приближенно-количественного эмиссионного спектрального анализа [21, 40] и требуют уточнения современными методами. При исследовании донных осадков водных объектов, для которых в нашей стране отсутствует разработанная система ПДК, это единственный способ объективной оценки уровня их химического загрязнения [25, 62, 69].

Обосновывая необходимость совместного рассмотрения почв и донных осадков, необходимо указать, что тундровые системы часто позиционируют как водно-болотные угодья, в которых отмечается тесная взаимосвязь наземных и водных объектов [33]. Большинство озер имеет термокарстовое происхождение, размеры и форма которых крайне изменчивы в пространственно-временном измерении. В этих условиях наблюдается тесная взаимосвязь компонентов водных и наземных ландшафтов. Почвы тундр зачастую оказываются затопленными в половодье и паводки, и, наоборот, водная взвесь покрывает пойму и оказывается на дневной поверхности при спаде уровня воды. В этих условиях отчетливо прослеживается генетическая взаимосвязь химического состава почв и донных отложений.

ЯНАО относится к региону с зонально-провинциальными гидрохимическими особенностями поверхностных и подземных вод, выраженными в высоких концентрациях железа и марганца. Наряду с этим, ежегодно в поверхностные водные

объекты автономного округа сбрасывается около 38 млн м³ сточных вод, из которых 70–90% недостаточно очищенные. В некоторых водных объектах автономного округа в результате хозяйственной деятельности в пределах водосборной площади отмечаются повышенные концентрации нефтепродуктов, фенолов, ионов ТМ, органических и биогенных веществ, а также высокие значения биохимического потребления кислорода за пять суток (БПК₅). К числу наиболее распространенных загрязняющих веществ, сопровождающих нарастающую техногенную нагрузку, относятся ТМ [14, 25, 37, 48, 71]. В этих условиях особое значение приобретает установление их региональных кларков в почвах и донных отложениях.

Цель работы – определение средних содержаний микроэлементов в донных отложениях и почвах (регионального геохимического фона) для изучения ландшафтно-геохимических условий севера Западной Сибири и использования в системе локального и производственного экологического мониторинга. В связи с этим были решены следующие задачи:

- 1) выявлена роль природных факторов в формировании химического состава почв и донных отложений тундровых и лесотундровых ландшафтов;
- 2) установлена связь содержания микроэлементов в почвах и донных отложениях с почвообразующими породами в зависимости от их генезиса и гранулометрического состава;
- 3) показана необходимость расчета региональных фоновых показателей отдельно для почв автономных и подчиненных геохимических позиций.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Район исследований располагается в пределах молодой эпигерцинской Западно-Сибирской плиты. Платформенный осадочный чехол выполнен юрскими, меловыми, палеогеновыми и четвертичными отложениями большой мощности [32, 45]. Четвертичные отложения, оказывающие наибольшее влияние на формирование почв и донных осадков, представлены позднеплейстоценовыми озерными, озерно-аллювиальными, аллювиально-морскими и аллювиальными образованиями, залегающими на долинных и бассейновых террасовых поверхностях разного гипсометрического уровня. Широко развиты голоценовые аллювиальные отложения пойменных террас. Породы в основном сложены монотонной толщей супесчано-суглинистых осадков и выглядят как чередование глин, супесей и песков [6]. Рельеф территории в целом равнинный при наличии ряда специфических форм, например, бугристых торфяников, достигающих в диа-

метре 10–15 м. Криогенные и посткриогенные процессы, вызванные наличием многолетней мерзлоты, определяют характер современного микро- и мезорельефа. Заболачивание территории приводит к выравниванию микропонижений за счет нарастания торфяников.

Основными типами почвообразующих пород на водораздельных равнинах севера Западной Сибири выступают породы легкого гранулометрического состава: суглинки и супеси, как сортированные пылеватые, так и мореноподобные с включением валунного материала. Развитые на низких речных террасах и в озерных котловинах песчаные почвообразующие породы нивелируют условия проявления зональности почв и обуславливают нечеткие переходы между подзонами, способствуют продвижению северных почв на юг. Подобное явление характерно для почвенного покрова Севера в целом [13]. При относительно бедном таксономическом наборе почв почвенный покров исследованной территории отличается пестротой и сложной структурой [39]. Относительно крупные и сравнительно однородные контуры образуют лишь болотные и аллювиальные почвы. Ареалы прочих почв представлены, как правило, регулярно-циклическими микрокомплексами, связанными с микрорельефом (пятнистым, бугорковатым, трещинно-полигональным, термопросадочно-мочажинным и др.), а также с мозаичностью и комплексностью растительного покрова. Изменение почв в пространстве четко сопряжено со сменой элементов мезорельефа, микроклимата, водного режима и растительности.

Широко распространены криометаморфические почвы (Turbic Cryosols) – светлоземы иллювиально-железистые (Spodic Cryosols по классификации WRB [58]) (O–E–ВНF–СRM) [41]. Встречаются подбуры иллювиально-железистые (Entic Podzols) (O–ВНF–BC–Cg). Преобладающими почвами в лесотундровых и северо-таежных ландшафтах являются подзолы иллювиально-железистые (Albic Podzols) (O–E–BF–BC–C), иллювиально-железистые языковатые глееватые и иллювиально-железистые глееватые (Albic Gleyic Podzols) (O–E–ВНF–BCg–Cg), а также глееземы типичные (Stagnic Gelic Gleysols) (O–G–CG), оподзоленные (Spodic Gleysols) (O–Ge–G–CG) и криогенно-ожелезненные (Spodic Gelic Gleysols) (O–Gcf–G–CG). Для недренированных плоских междуречий характерны торфяные почвы (Histosols): олиготрофные (Hemic Histosol) (O–TO–TT), эутрофные (Sapric Histosol) (O–TE–TT), олиготрофные мерзлотные (Hemic Cryic Histosol) (O–TO–TT \perp) и торфяно-глееземы (Histic Gleysols) (O–T–G). В поймах рек формируются аллювиальные почвы (Fluvisols) глеевые (Stagnic Fluvisols) (AY–G–CG), торфяно-глеевые (Histic) (T–G–CG) и гумусовые (Eutric Fluvisols) (AY–C).

Донные отложения водных объектов исследованной территории характеризуются различным генезисом (озерные, аллювиальные, старичные) и гранулометрическим составом: от пелитовых осадков до разнозернистых песков [2, 25]. Наиболее широко представлено три гранулометрических типа осадков. Мелкозернистые хорошо сортированные пески распространены на дне рек и в прибрежной зоне крупных озер. Илистые пески повсеместно встречаются в реках, озерах и старицах. Илы и торфянистые илы чаще залегают на дне стариц и небольших озер, в качестве наилка могут быть представлены в водотоках. Тип осадков во многом зависит от состава четвертичных отложений.

Объектом исследований являются почвы и донные осадки водных объектов тундр и лесотундр севера Западной Сибири. В период с 1993 по 2017 гг. в рамках фоновой оценки территории и производственного экологического мониторинга проведены комплексные геоэкологические исследования, в состав которых входил отбор проб почв и донных отложений на территории 30 нефтегазоконденсатных месторождений. Участки опробования выбирали в сходных физико-географических условиях вблизи объектов нефтегазовых промыслов и на фоновых территориях. Репрезентативность обеспечивали соблюдением общих требований к проведению пробоотбора (ГОСТ 7.4.1.02-83; ГОСТ 17.4.3.01-83; ГОСТ 17.4.4.02-84 и др.). Пробы почв отбирали из двух генетических горизонтов: поверхностного аккумулятивного (O, T) и срединного (BF, ВНF, G). Всего за время исследований отобрано более 1700 проб почв. Следует подчеркнуть, что обследованные за обозначенный период лицензионные участки равномерно распределены по территории ЯНАО и охватывают практически все разнообразие ландшафтных и геолого-геохимических условий (рис. 1), а загрязнение почв и донных осадков в исследуемом районе в результате добычи углеводородного сырья носит локальный характер [25].

Во всех пробах почв и донных осадков определяли величину рН потенциметрическим методом; гранулометрический состав 52 образцов почв из опорных разрезов устанавливали пипеточным методом. Разделение образцов почв на легкие и тяжелые по гранулометрическому составу осуществляли по соотношению содержания физической глины (суммы частиц <0.01 мм) и физического песка (суммы частиц >0.01 мм), согласно классификации Н.А. Качинского (1957). В остальных пробах гранулометрический состав почв определяли в полевых условиях методом скатывания шнура по Н.А. Качинскому. Наряду с общими физико-химическими параметрами в пробах почв и донных отложений анализировали содержание металлов (Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Pb, Hg, Sr, Sc, Cd, Ba). При установлении региональ-

ного геохимического фона использовали только результаты химического анализа образцов, выполненного методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского. Анализ подвижных форм Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb и Cd, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, проводили в 120 пробах почв на атомно-абсорбционном спектрометре NovAA 300 в лаборатории геоэкологического мониторинга СПбГУ.

Для каждого лицензионного участка проводили расчет фоновых концентраций ТМ в почвах и донных осадках в соответствии с правилом трех сигм. За локальный фон принимали величину $M \pm \delta$, где M – среднее арифметическое содержание элемента в почвах и донных осадках после удаления аномальных концентраций, δ – стандартное отклонение. Аномальным содержанием ТМ для исследованной территории является содержание $M \pm 2\delta$, а сильно аномальным $M \pm 3\delta$ [4].

Для установления аномальных концентраций элементов, обусловленных техногенными причинами или погрешностями при отборе и подготовке проб, применяли формулу, используемую в поисковой геохимии для расчета минимально-аномальных концентраций ($x_{\min.an}$):

$$x_{\min.an} = M \pm t\delta,$$

где M – среднее арифметическое содержание; δ – стандартное отклонение содержаний; t – коэффициент Стьюдента (значения его табулированы в зависимости от уровня значимости и числа проб).

Величина коэффициента Стьюдента с доверительной вероятностью 0.95 для выборки $n = 60$ и более составляет 2.0. Таким образом, окончательная формула имеет следующий вид: $x_{\min.an} = M \pm 2\delta$.

Все значения, превышающие минимально-аномальную концентрацию, исключали из расчета регионального фона, который определяли по очищенным выборкам. В дальнейшем полученные результаты оценивали на сходство и различие средних по всем изучаемым элементам с помощью критерия Стьюдента. Это позволило дать обоснование объединения отдельных выборок при расчете регионального фона для разных типов почв.

При оценке влияния почвообразующих пород на формирование химического состава почв и донных осадков применяли метод ранжированных геохимических спектров с использованием парного коэффициента корреляции Спирмена [11]. Анализ выполняли на примере Береговой и Южно-Парусового лицензионных участков, на территории которых в основном залегают озерно-аллювиальные суглинки и супеси (laIII) и аллювиально-морские суглинки (amIII) соответственно.

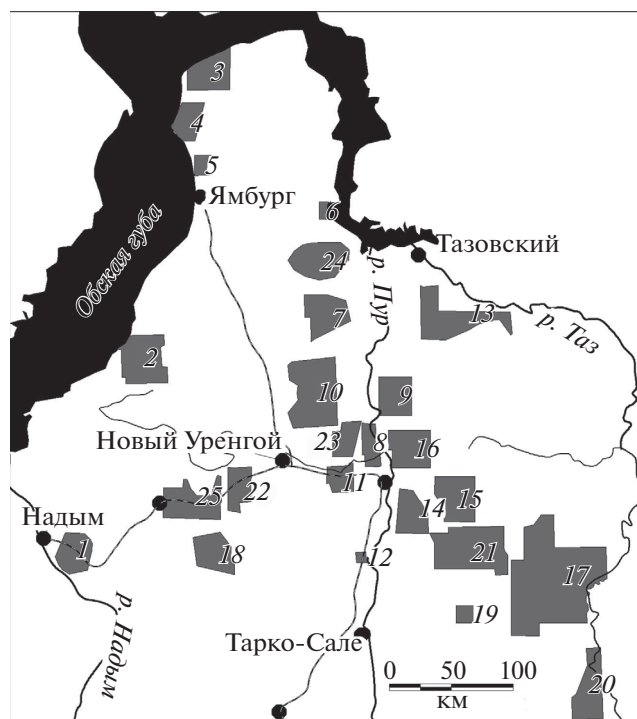


Рис. 1. Карта района исследований. Лицензионные участки: 1 – Надымский; 2 – Западно-Песцовый; 3 – Северо-Парусовый; 4 – Парусовый; 5 – Южно-Парусовый; 6 – Юрхаровский; 7 – Северо-Самбургский; 8 – Западно-Ярояхинский; 9 – Северо-Пуровский; 10 – Самбургский; 11 – Ево-Яхинский; 12 – Пырейный; 13 – Тазовско-Заполярный; 14 – Береговой; 15 – Северо-Часельский; 16 – Яро-Яхинский; 17 – Кынско-Часельский; 18 – Ямсовейский; 19 – Хадырьяхинский; 20 – Точипылькынский; 21 – Малохадырьяхинский; 22 – Юбилейный; 23 – Восточно-Уренгойский; 24 – Северо-Уренгойский; 25 – Западно-Юбилейный.

Особенности вертикальной миграции металлов в почвенном разрезе выявляли с использованием показателя контрастности, который определялся как отношение максимального и минимального среднего содержания анализируемых металлов в выделенных горизонтах по типам почв. Его значение всегда больше единицы.

Практика расчета региональных кларков различных территорий показывает, что зачастую используется подход, основанный на административном делении территории, например, кларк почв Карелии [3], кларк административных районов ЯНАО [31, 46] и др. Однако более обоснованным представляется использование в качестве критерия выделения территорий их геологическое и ландшафтное сходство [7, 16]. Приуроченность севера Западной Сибири к определенным физико-географическим условиям, относительная минералого-геохимическая однородность позволяют использовать полученные данные для расчета регионального геохимического фона (ре-

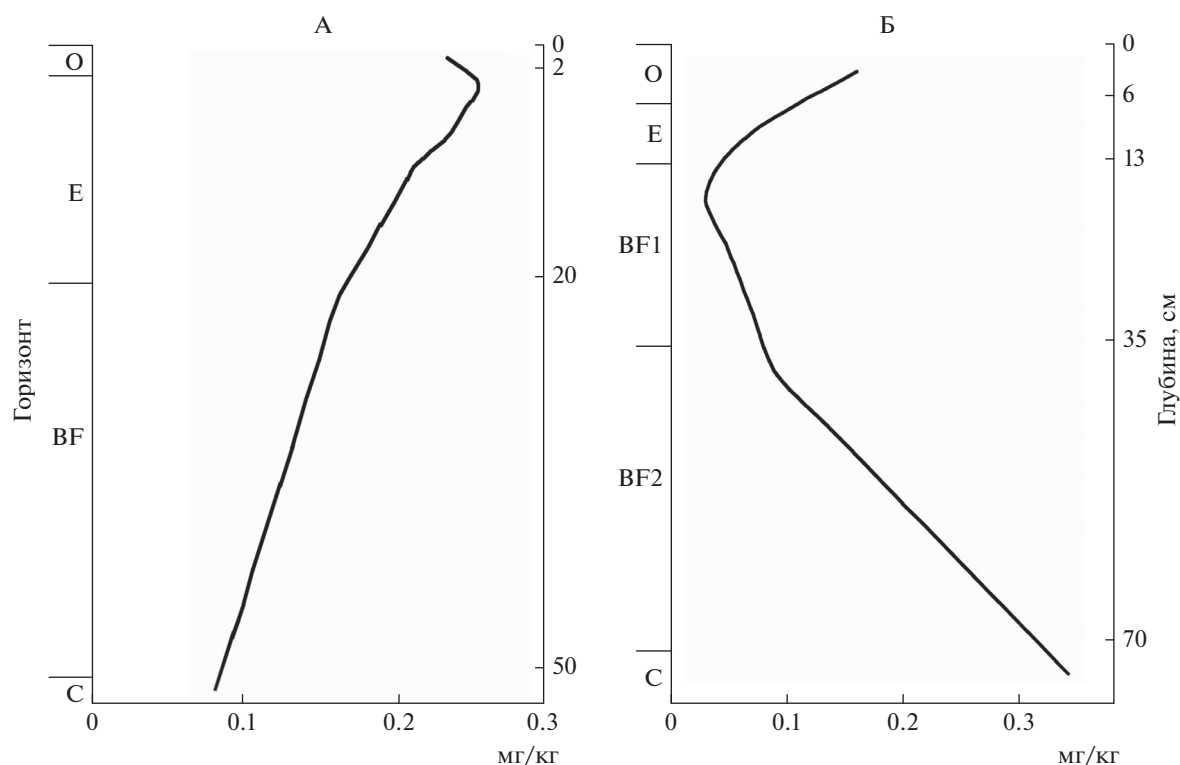


Рис. 2. Радиальное распределение Cd в лесных почвах Западно-Яряхинского ЛУ: А – подзол иллювиально-железистый супесчаный под березово-лиственнично-кустарничково-лишайниковым редколесьем; Б – подзол иллювиально-железистый на суглинистых отложениях под лиственничником кустарничково-лишайниковым.

гионального кларка) почв и донных осадков, ограничив территорию тундрами, лесотундрами и северо-таежными ландшафтами Надым-Пур-Тазовского региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ химического состава почв. Проведенные исследования показали, что изученные почвы отличаются низким содержанием ТМ (табл. 1). Их концентрация в 3–9 раз ниже кларковых значений [7, 42, 47, 68, 73], что хорошо согласуется с литературными данными [17, 20, 25, 27, 28, 35–37]. Вместе с тем содержание большинства ТМ в почвах характеризуется значительным разбросом величин.

Сопряженный анализ полученных данных, ландшафтно-геохимической обстановки и источников антропогенного воздействия показал, что существует несколько факторов, определяющих варьирование концентрации ТМ в почвах изученной территории. К их числу относятся высокая контрастность природных условий, определяющая сложный и мозаичный характер почвенного покрова, а также закономерности радиальной и латеральной миграции химических элементов [70, 72].

Почвообразующие породы района исследований существенно различаются по гранулометрическому составу: от глин и суглинков аллювиально-морского и озерно-аллювиального происхождения до аллювиальных разнородных песков (табл. 2). На них формируются почвы тяжелого и легкого гранулометрического состава, обладающие разной способностью к накоплению металлов (рис. 2). Уровень концентрации микроэлементов в почвах зависит от генезиса подстилающих четвертичных пород. Анализ состава верхнеплейстоценовых и голоценовых отложений, слагающих территорию исследований, показал, что относительно низкое содержание микроэлементов в озерно-аллювиальных и аллювиальных отложениях сочетается с высокой концентрацией сидерофильных (V, Cr, Co, Ni) и халькофильных (Zn, Cu, Pb) элементов в аллювиально-морских отложениях третьей и четвертой морских террас. Повышенные содержания большинства ТМ характерны для почв Северо-Парусового, Южно-Парусового, Парусового, Западно-Песцового, Тазовско-Заполярного месторождений, формирующихся преимущественно на глинистых и суглинистых аллювиально-морских отложениях.

Особенность тундровой зоны – контрастность окислительно-восстановительных условий. Для

Таблица 1. Содержание ТМ в почвах исследованной территории (по результатам ИСПМС), мг/кг

Лицензионный участок	Горизонт	n	Ba	Mn	Zn	Cu	Ni	Co	Pb	Cd	Cr	Hg	Fe	V
Ландшафты типичных тундр на аллювиально-морских отложениях														
Северо-Парусовый	Органогенный	40	205	1124	41.6	9.50	35.8	15.3	9.82	0.36	19.2	0.165	21790	27.1
	Срединный	41	522	549	39.7	11.6	18.1	15.1	9.34	0.11	36.8	0.023	25300	66.6
Парусовый	Органогенный	26	486	701	49.3	23.9	23.5	11.4	15.0	0.20	47.1	0.051	21105	67.8
	Срединный	26	575	492	48.0	22.6	24.7	11.1	14.0	0.075	57.7	0.023	24780	82.9
Южно-Парусовый	Органогенный	21	324	1300	53.1	12.3	25.2	16.4	14.6	0.54	26.5	0.180	13580	41.4
	Срединный	21	546	632	35.0	12.7	15.6	16.9	9.46	0.12	48.4	0.027	23730	81.7
Ландшафты южных тундр на аллювиально-морских отложениях														
Западно-Песцовый	Органогенный	9	211	405	43.5	9.04	15.0	8.30	12.0	0.25	29.4	0.107	Н/д	34.7
	Торфяной	19	118	148	31.7	7.96	13.1	4.74	7.94	0.17	23.7	0.088	»	28.8
	Срединный	28	389	304	35.4	10.5	15.9	7.66	11.2	<0.1	56.6	0.027	»	68.1
Лесотундровые ландшафты на аллювиальных отложениях														
Новоуренгойский	Органогенный	16	242	195	35.7	7.40	5.59	2.65	12.7	0.32	9.11	0.105	»	13.3
	Срединный	14	190	116	13.8	3.21	4.11	2.03	4.20	<0.1	13.4	0.011	»	23.8
	Органогенный	12	209	54	27.4	6.02	6.06	1.69	10.1	0.22	13.4	0.099	6971	11.5
	Торфяной	15	62	17	14.9	3.87	5.34	1.91	4.60	0.22	9.35	0.072	3573	7.41
Яро-Яхинский	Органогенный	22	120	36	7.77	2.35	3.23	0.77	3.07	<0.1	9.66	Н/д	1980	10.4
	Торфяной	8	168	198	32.9	7.63	7.87	3.14	11.8	0.22	15.5	0.143	8875	13.9
	Срединный	20	83	55	19.0	9.80	6.39	2.33	5.57	0.19	8.70	0.137	10580	10.3
Самбургский	Органогенный	10	351	164	19.8	5.62	8.07	3.99	8.31	<0.1	27.7	0.139	19900	31.8
	Торфяной	22	380	271	35.8	7.77	9.04	4.08	13.0	0.18	22.5	0.111	14560	19.4
	Срединный	13	106	43	13.8	6.45	8.99	2.36	4.48	0.14	25.1	0.109	13692	17.3
Тазовско-Заполярный	Органогенный	30	227	95	16.7	4.35	5.48	2.46	5.80	0.054	24.1	0.025	11720	22.5
	Торфяной	32	301	579	43.7	11.5	16.9	8.92	14.5	0.39	31.3	0.143	17259	44.1
	Срединный	9	169	191	30.7	21.3	17.7	5.75	8.5	0.43	32.8	0.067	13118	37.8
	Органогенный	35	544	785	50.1	14.7	28.1	18.0	13.4	0.14	67.9	0.019	30110	91.0

Таблица 1. Продолжение

Лицензионный участок	Горизонт	n	Ba	Mn	Zn	Cu	Ni	Co	Pb	Cd	Cr	Hg	Fe	V
Северо-Часельский	Органогенный	13	112	240	29.1	7.63	11.0	3.18	11.2	0.36	17.5	0.145	12255	13.6
	Торфяной	11	129	434	17.8	13.3	16.5	5.71	4.39	0.37	25.1	0.163	21088	20.0
	Срединный	35	458	435	39.5	9.70	20.1	8.51	10.4	0.13	71.8	Н/д	25460	59.9
Северо-гаежные ландшафты на озерно-аллювиальных отложениях														
Хадрыяхинский	Органогенный	6	112	495	26.1	6.50	8.25	6.76	7.60	0.27	7.14	0.015	10725	9.68
	Торфяной	40	62	42	20.9	5.98	6.04	2.23	4.89	0.24	6.72	0.067	6273	7.01
Береговой	Срединный	10	440	236	29.5	10.4	15.0	5.56	12.5	0.071	52.9	0.026	20825	69.4
	Органогенный	128	275	345	36.9	8.25	8.56	4.76	16.4	0.440	23.5	0.050	11842	28.4
Пырейный	Торфяной	24	85	47	14.5	6.11	6.10	2.20	5.83	0.21	10.0	0.022	3879	10.1
	Срединный	132	530	324	33.9	8.72	11.5	8.22	11.0	0.087	46.8	0.019	25750	71.5
Точипылькынское	Органогенный	67	226	163	33.2	6.98	7.59	2.82	14.9	0.42	13.2	0.016	7940	16.0
	Торфяной	40	88	60	16.2	6.37	5.32	1.71	4.66	0.20	9.24	0.022	8555	10.4
	Срединный	70	441	240	24.1	7.02	10.2	5.27	10.8	0.054	36.6	0.024	21850	54.5
	Органогенный	8	54	500	35.0	5.98	5.22	2.95	8.50	0.38	5.06	Н/д	7016	5.30
	Торфяной	13	50	298	38.1	7.64	7.14	2.74	8.65	0.46	4.72	Н/д	8262	4.06
	Срединный	11	396	335	38.2	5.11	9.22	7.90	7.40	<0.1	24.8	0.009	15830	33.2
Северо-гаежные ландшафты на аллювиально-морских отложениях														
Малохадрыяхинский	Органогенный	12	43	56	23.2	4.27	6.51	1.95	7.68	0.63	4.31	Н/д	3233	4.06
	Торфяной	19	48	31	11.2	7.03	9.06	2.15	2.66	0.61	6.40	»	5000	7.39
	Срединный	9	401	290	32	6.21	17.5	15.0	12.7	<0.1	64.4	0.014	25900	86.9
Среднее	Органогенный	420	257	375	35.6	8.68	12.0	5.80	13.4	0.35	20.6	0.100	12877	25.0
	Торфяной	233	77	96	19.9	7.25	7.19	2.44	5.48	0.28	10.4	0.079	7649	10.4
Пурская низменность [37]	Срединный	490	460	339	31	8.7	13	8.4	9.90	0.08	42	0.020	22300	60
	Среднее	Н/д	Н/д	Н/д	10	14	2	10	Н/д	60	Н/д	Н/д	50	Н/д

Таблица 1. Окончание

Лицензионный участок	Горизонт	n	Ba	Mn	Zn	Cu	Ni	Co	Pb	Cd	Cr	Hg	Fe	V
Большеземельская тундра: Тундровые поверхностно-глеевые [15]	A0	31	»	»	17.6	3.5	5.3	H/д	6.9	0.19	»	0.168	H/д	H/д
	Bgh	34	»	»	22.9	5.2	10.6	»	7.1	0.11	»	0.0214	»	»
Болотно-тундровые торфянисто-глеевые [15]	A0	21	»	»	20.0	4.1	5.4	»	8.0	0.19	»	0.118	»	»
	Bgh	14	»	»	23.3	6.0	15.5	»	7.5	0.12	»	0.024	»	»
Болотные верховые торфяные мерзлотно- [15]	T1	36	»	»	27.0	6.9	7.8	»	6.3	0.12	»	0.057	»	»
	A		385	5670	132	18	7.3	2.8	72	H/д	72	H/д	H/д	45
Иллювиально-железистые подзолы, Тюменская область [21]*	B		282	1220	51	18	12.7	6.3	12	»	91	»	»	29
			H/д	1060	85.5	33.8	25.9	15.6	16.4	»	59.5	»	»	H/д
Почвы Западной Сибири [17]*			390	126	46	9.69	9.18	1.57	18.8	0.303	2.91	0.227	1970	4.86
			28.7	465	25.5	10.5	16.1	5.7	3.05	0.024	35.2	<0.06	38817	42.1
Баренц-регион, (Норвегия, Финляндия, Россия) [66]	Аккумулятивный	617	H/д	239	66	10.2	12.0	H/д	11.9	0.44	18.4	0.111	10900	H/д
	Иллювиальный	609	»	420	55	15.1	21.2	»	11.4	0.12	42.1	0.025	25800	»
Шпицберген [56]	Поверхностный	57	500	1500	150	70	60	25	25	0.4	50	0.09	40000	95
	Минеральный	57	»	420	55	15.1	21.2	»	11.4	0.12	42.1	0.025	25800	»
Британская Колумбия, Оминка регион (Канада) [64]	Среднее	H/д	500	1000	90	30	50	8.0	12	0.35	70	0.06	40000	90
			500	850	50	20	40	8	10	0.13	200	0.08	38000	100
Среднее содержание в почвах [42]			500	500	50	20	20	9	20		60			90
Кларк почв по Виноградову [7]			500	500	50	20	20	9	20		60			90
Кларк почв по Яровскому [47]			500	500	50	20	20	9	20		60			90

* Данные приближенно-количественного эмиссионного спектрального анализа; H/д – нет данных.

Таблица 2. Содержание ТМ в основных типах четвертичных пород севера Западной Сибири, мг/кг

Металл	Верхнеплейстоценовые			Голоценовые	
	аллювиально-морские	озерно-аллювиальные		аллювиальные	
	глины и суглинки (<i>n</i> = 10)	глины и суглинки (<i>n</i> = 14)	супеси (<i>n</i> = 8)	супеси (<i>n</i> = 15)	пески (<i>n</i> = 19)
Ba	479	543	317	464	313
Mn	597	228	89	194	74
Zn	76.8	39.8	10.0	15.3	5.91
Cu	20.1	9.54	3.18	3.67	1.67
Ni	30.6	15.0	3.74	6.17	1.98
Co	17.5	6.89	2.04	3.29	1.15
Pb	14.1	9.91	6.68	8.98	4.37
Cd	0.16	0.17	0.022	0.043	0.014
Cr	83.6	40.1	13.2	18.7	6.36
Hg	0.026	0.021	—	0.008	—
Fe	23030	7420	5390	8260	3080
V	141	60.5	18.7	28.0	9.36
Sc	10.4	3.50	2.06	3.50	1.06
Sr	186	125	52.7	104	45.8

заболоченных участков подчиненных геохимических позиций типична кислая восстановительная обстановка, переходящая в нижних горизонтах в глеевую; для автоморфных – окислительная среда в верхних горизонтах, обедненных гумусом и илстой фракцией [5, 6]. В результате отмечается увеличение содержания ТМ (Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Ba и V) в глеевых и илловидных горизонтах почв в среднем в 1.5–3 раза. Это согласуется с тем, что для торфяно-болотной почвы (Fibric Fluvis Histosols) характерно невысокое концентрирование сорбированных форм Fe, Ni и Co в гор. Ат, а торфянисто-глеевая почва (Histic Gleysols) характеризуется их аккумуляцией в гор. Т и В_G [1].

Закономерности аккумуляции ТМ меняются при переходе от полигональных к южным тундрам и лесотундрам [28, 29]. Наблюдается уменьшение концентрации Ba, Zn, Cu, Fe, Ni и Co в органогенных горизонтах почв от полигональных к плоско- и крупнобугристым торфяникам. Концентрация Pb, Cd в торфе остается практически постоянной, а содержание Cr и V увеличивается в плоскобугристых торфяниках.

Различия в микроэлементном составе почв исследованной территории наблюдаются и при переходе от торфяно-болотных к подзолистым почвам (подзолы илловидно-железистые и торфяно-подзолы глеевые Histic Gleyic Podzol), что подтверждают литературные данные [8, 34, 38].

Органогенные горизонты подзолистых почв характеризуются более активной аккумуляцией Ba и Pb по сравнению с торфяно-болотными почвами, что подчеркивает отмеченную ранее способность Pb аккумулироваться в самой верхней части почвенного профиля: в подстилках, грубогумусовых и гумусовых горизонтах [12, 22]. На территории исследований Ba интенсивно поглощается кустарничками и кустарниками, определяя повышенное его содержание в органогенных горизонтах подзолистых почв (Podzols) [26]. Преимущественно легкий гранулометрический состав определяет также более высокую концентрацию Ba в лесных и лесотундровых почвах в составе полевых шпатов.

Подзолы илловидно-железистые отличаются пониженным содержанием большинства ТМ, что связано с их низкими концентрациями в почвообразующих озерно-аллювиальных отложениях. Это согласуется с представлениями о бедности микроэлементного состава почв, сформировавшихся на песчаных породах и хорошо изученных на примере подзолов [54, 63, 65]. Наряду с этим, сравнение концентрации металлов в органогенных горизонтах тяжелых и легких по гранулометрическому составу почв (для $p = 0.05$) показало статистически достоверное превышение содержания Mn, Ni, Co, Cd, Cr, Fe и Sc в тяжелых почвах (табл. 3).

Техногенное загрязнение при освоении месторождений углеводородного сырья сопровождается увеличением концентрации всех изученных ТМ [25, 37, 49, 61]. Повышенные содержания Ва, Ni и V, обладающих низкой миграционной способностью в тундровых ландшафтах, отражают химическое загрязнение почв при нефтегазодобыче. Это согласуется с данными Ю.Н. Водяницкого с соавт. [10], отмечающих закрепление Ti, V, Cr, Ni, Zr и Ba при нефтяном загрязнении в верхнем слое торфа. Разливы шламовых растворов индицируются загрязнением почв Ва и Cr, а проведение сварочных работ при монтаже/демонтаже оборудования скважин и ремонте автомобильной техники – увеличением концентрации Mn в поверхностном слое почв [20]. Однако загрязнение почв в целом носит локальный характер и приурочено к объектам инфраструктуры нефтегазовых промыслов. Доля проб с превышением ОДК и ПДК составляет первые проценты от их общего количества [25].

Анализ химического состава донных отложений. Формирование химического состава донных осадков северных регионов обусловлено в основном седиментационным, вещественным и фациальным факторами [25, 51, 55]. Седиментационный фактор отражает зависимость содержания элементов от гранулометрического состава отложений. Вещественный фактор указывает на связь химизма осадков с подстилающими горными породами. Фациальный фактор раскрывает различные обстановки осадконакопления. Он обусловлен характером водного объекта (аллювиальные, старичные, озерные отложения) и степенью заболоченности ландшафтов.

Как показали исследования, содержание ТМ в донных осадках водных объектов в первую очередь определяется гранулометрическим составом отложений. При оценке распределения металлов отмечается значительное снижение их концентрации в ряду выделенных типов донных отложений: илы, торфянистые илы > илистые пески, алевриты > мелкозернистые пески. Так, среднее содержание в илах Fe и Mn в 11 раз, Ni – в 8,5, Co – в 6,5, Zn, Cu, Cr, V – в 5 раз больше, чем в мелкозернистых песках (рис. 3). Это обусловлено разной сорбционной способностью представленных гранулометрических типов осадков.

Различие в концентрации микроэлементов в четвертичных породах разного генезиса накладывает отпечаток на состав донных осадков, особенно представленных тонкодисперсными фракциями. Наименее значимым в формировании геохимической структуры донных отложений оказался фациальный фактор. Выполненная оценка выявила отсутствие статистически значимых различий содержания ТМ в донных осадках рек, озер и стариц одного и того же гранулометрического со-

Таблица 3. Среднее содержание ТМ в органогенных горизонтах почв, сформировавшихся на разных по гранулометрическому составу почвообразующих породах, мг/кг

Элемент	Почвообразующие породы	
	легкие (n = 92)	тяжелые (n = 256)
Ba	301 ± 94	241 ± 23
Mn	248 ± 54	420 ± 85
Zn	34.1 ± 3.5	36.2 ± 1.81
Cu	8.11 ± 0.83	8.88 ± 0.64
Ni	9.0 ± 1.6	13.1 ± 2.1
Co	3.92 ± 0.72	6.47 ± 0.92
Pb	13.3 ± 1.3	13.5 ± 0.6
Cd	0.31 ± 0.04	0.36 ± 0.03
Cr	17.9 ± 2.7	21.6 ± 2.2
Hg	0.093 ± 0.011	0.103 ± 0.008
Fe	10264 ± 1844	13816 ± 1624
V	21.6 ± 3.9	26.2 ± 3.0
Sc	3.36 ± 0.50	4.25 ± 0.35
Sr	104 ± 39	80.2 ± 5.1

става. Однако в заболоченных и заторфованных ландшафтах низменных равнин Надым-Пур-Тазовского региона установлена активная миграция и аккумуляция Fe и Mn. На окислительном барьере в реках эти металлы в форме гидроксидов осаждаются, создавая высокие концентрации в донных осадках (Fe до 17%; Mn более 0.2%). Таким образом, фациальный фактор оказывает влияние в основном на накопление Fe и Mn, а распределение остальных элементов в большей мере зависит от седиментационного и вещественного факторов.

Обоснование расчета фонового содержания (региональных кларков) ТМ в почвах и донных отложениях. В условиях высокой контрастности природных условий исследованной территории и проявления антропогенного загрязнения на локальном уровне, сложного и мозаичного характера почвенного покрова применение общеизвестных подходов (по гумусовому горизонту или среднезвешенному по всему почвенному разрезу) для *расчета регионального фонового содержания ТМ в почвах* представляется малоэффективным. Как было показано выше, химический состав почв формируется под влиянием состава и генезиса подстилающих пород и интенсивности торфонакопления, без учета которых невозможно оценить региональные фоновые показатели содержания ТМ в почвах. Существенным фактором выступает гранулометрический состав срединного горизонта почв.

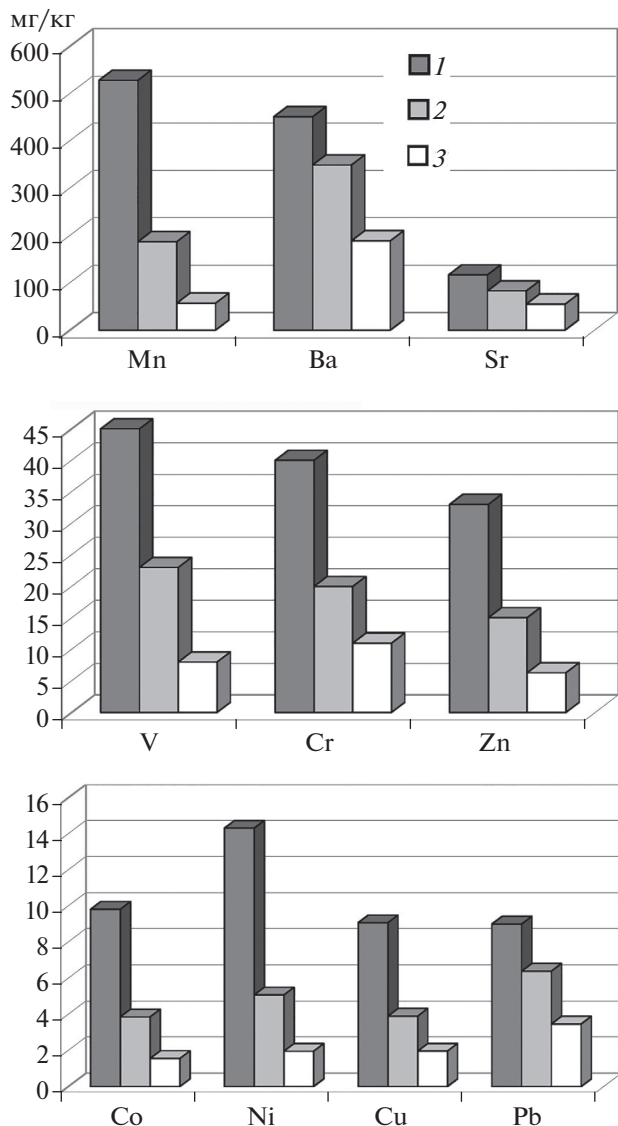


Рис. 3. Распределение металлов по гранулометрическим типам донных осадков: ила (1), песка илистого (2), песка мелкозернистого (3).

Метод ранжированных геохимических спектров с использованием парного коэффициента корреляции Спирмена (на примере Берегового ЛУ) подтвердил большое влияние почвообразующих пород на микроэлементный состав почв. Ранжирование проведено по широко распространенным на территории лицензионного участка супесям и суглинкам озерно-аллювиального генезиса (IaIII) (рис. 4). Влияние четвертичных пород на состав срединного гор. В отразилось в высоких коэффициентах корреляции Спирмена: в легких почвах с супесями $r = 0.97$, с суглинками 0.91; в тяжелых 0.95 и 0.85 соответственно. Значимая положительная корреляция спектра металлов с суглинками отмечается и в органогенных горизон-

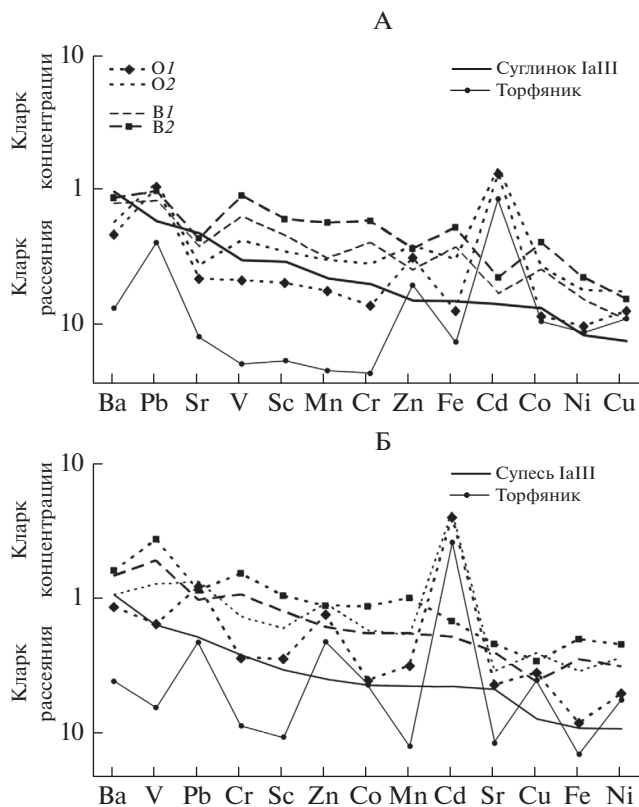


Рис. 4. Ранжированные по озерно-аллювиальным (IaIII) суглинкам (А) (кларки концентрации и рассеяния рассчитывались по отношению к кларку глин [42]) и супесям (Б) (кларки концентрации и рассеяния рассчитывались по отношению к кларку песчаников [42]) спектры металлов в органогенном (О) и срединном (Б) горизонтах почв легкого (1) и тяжелого (2) состава территории Берегового лицензионного участка.

тах почв как легкого ($r = 0.63$), так и тяжелого составов ($r = 0.57$). Зависимость спектра ТМ в аккумулятивных горизонтах от супесей выше ($r = 0.71$ и 0.74 соответственно). При уровне значимости $p = 0.05$ критическое значение коэффициента корреляции Спирмена составляет 0.55. При этом необходимо отметить, что спектр металлов в торфяниках не коррелируется ни с супесями ($r = 0.22$), ни с суглинками ($r = -0.09$) и определяется химизмом мхов и лишайников, участвующих в образовании торфов. Об этом свидетельствует коэффициент корреляции между содержанием микроэлементов в торфе и в лишайнике *Cladonia alpestris* (L.) Rabenh., равный 0.99 (при $p = 0.05$ критическое значение – 0.39). В то же время роль кустарничка *Ledum decumbens* (Ait.) Lodd. ex Steud в формировании микроэлементного состава торфов незначительна ($r = 0.11$).

Таким образом, химический состав торфяников, широко распространенных в подчиненных геохимических позициях тундровой и лесотундровой зоны, мало зависит от почвообразующих

пород, что отличает их от минеральных почв автономных ландшафтов с дифференцированным профилем – светлосемов, подбуров, глееземов и др. Это подтверждает необходимость учитывать данный факт при проведении мониторинга и геоэкологических исследований и доказывает обоснованность введения фоновых значений содержания металлов отдельно для торфяников. Как известно, вопрос о необходимости разработки критериев оценки загрязнения торфяников неоднократно обсуждался в литературе [9, 43].

Анализ полученных спектров металлов в почвах позволяет говорить, что наиболее тесная связь с органическим веществом в ряду изученных элементов характерна для Cd, который отличается накоплением в торфяниках и аккумулятивным горизонте светлосемов, глееземов, подбуров и др. почв независимо от их гранулометрического состава. Концентрация Cd в органогенных горизонтах почв на легких и тяжелых почвообразующих породах (0.393 и 0.433 мг/кг соответственно) почти на порядок выше его содержания в срединных горизонтах (0.051 и 0.067 мг/кг). В меньшей степени такая закономерность типична и для Zn. Существенной причиной концентрации в верхнем горизонте служит высокая доля подвижных форм этих металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийной вытяжкой с pH 4.8. Она составляет для Cd 24–45%, для Zn – 12–22%.

По отношению к почвообразующим породам в почвах (за исключением торфяников) наблюдается аккумуляция Pb. Основная группа сидерофильных металлов (V, Sc, Mn, Fe, Co, Ni) по сравнению с почвообразующими породами накапливается в иллювиальном гор. В и в органогенном горизонте почв, сформировавшихся на тяжелых по гранулометрическому составу почвообразующих породах, а Cr, Ba, Sr – только в иллювиальном горизонте. Из всех изученных металлов наиболее равномерным распределением по генетическим горизонтам характеризуется Cu.

Результаты факторного анализа методом главных компонент [20, 27, 29] подтвердили ведущую роль в формировании микроэлементного состава почв исследованной территории породного фактора, влияния гранулометрического состава почвообразующих пород и процесса торфонакопления, обусловленного неполным разложением органического вещества и низким содержанием ТМ, находящихся в составе растительных остатков.

Исходя из этого, *расчет регионального геохимического фона* проведен для органогенных горизонтов, легких и тяжелых срединных горизонтов почв раздельно. Разработка региональных показателей для почв с учетом их гранулометрического состава укладывается в алгоритм действующих ОДК валовых содержаний ТМ в почвах и не требует серьезной аргументации.

Важным моментом при проведении экологического мониторинга тундровых почв является нормирование химического состава органогенных горизонтов. Проведенные исследования показывают, что содержание всех ТМ в отложениях торфяников и органогенных горизонтах почв статистически достоверно меньше, чем в легких и тяжелых по гранулометрическому составу срединных горизонтах и почвообразующих породах. В то же время содержание ТМ в торфе и полуразложившихся органических остатках поверхностных горизонтов минеральных почв также существенно различается. Например, в торфяниках концентрация Ba, Mn, Sc, Sr и Pb в 3–5 раз, Zn, Co, Cr и Cr в 2–3 раза ниже, чем в органогенных горизонтах минеральных почв. Исключение составляет содержание Cu, Ni, Fe, Cd и Hg, уровень которого практически не меняется в аккумулятивных горизонтах при переходе от автономных к подчиненным почвам.

При этом концентрации ТМ в органогенных горизонтах почв легкого и тяжелого гранулометрического состава относительно близки между собой, хотя сохраняются статистически значимые различия между содержаниями сидерофильных элементов. Однако они существенно меньше установленных расхождений между иллювиальными горизонтами и торфяниками. Это позволяет объединить аккумулятивные горизонты в одну выборку и провести расчет регионального геохимического фона ТМ для органогенных горизонтов почв в целом (табл. 4).

По способности накопления в генетических горизонтах почв в условиях многолетнемерзлых пород все изученные металлы можно разделить на две группы. Литофильные и сидерофильные элементы (Ba, Sc, Sr, Cr, Fe, V, Co) характеризуются уменьшением концентрации в ряду: гор. В (тяжелые почвы) > гор. В (легкие) > органогенный горизонт > торфяники. Халькофилы Zn, Cu, Pb концентрируются в первую очередь в органогенном горизонте и их содержание уменьшается в последовательности: органогенный горизонт > > гор. В тяжелые > гор. В легкие > торфяники, а Cd, Hg – органогенный горизонт > торфяники > > гор. В (тяжелые) > гор. В (легкие). Mn и Ni занимают промежуточную позицию: гор. В (тяжелые) > органогенный горизонт > гор. В (легкие) > > торфяники. При этом отмечается низкая контрастность распределения Zn, Cu, Ni и Pb по генетическим горизонтам: отношение максимальной средней концентрации к минимальной средней величине не превышает 2. У сидерофильных и литофильных металлов эта величина составляет от 4.1 (Fe) до 8.1 (V). Высокая контрастность распределения, приуроченность максимальных величин к иллювиальным горизонтам и тесная корреляционная связь с почвообразующими породами указывают на низкую миграци-

Таблица 4. Региональный фон ТМ в различных горизонтах почв Надым-Пур-Тазовского региона, мг/кг

Элемент	Гор. О		Гор. В		Торфяники ($n = 211$)
	на легких и тяжелых породах ($n = 344$)	гранулометрический состав			
		легкий ($n = 113$)	тяжелый ($n = 267$)		
Ba	224 ± 12	379 ± 30	473 ± 11	65.1 ± 5.2	
Mn	240 ± 28	183 ± 24	264 ± 19	49 ± 9	
Zn	34.9 ± 1.4	19.7 ± 1.8	32.9 ± 1.6	17.4 ± 1.5	
Cu	7.92 ± 0.33	5.54 ± 0.64	9.11 ± 0.50	6.24 ± 0.58	
Ni	8.89 ± 0.54	7.05 ± 0.97	12.9 ± 0.8	6.34 ± 0.50	
Co	4.09 ± 0.32	4.68 ± 0.60	8.50 ± 0.62	2.07 ± 0.16	
Pb	13.5 ± 0.5	8.13 ± 0.73	10.6 ± 0.4	4.93 ± 0.45	
Cd	0.352 ± 0.023	0.049 ± 0.004	0.077 ± 0.006	0.248 ± 0.024	
Cr	18.6 ± 1.4	26.1 ± 3.0	46.0 ± 2.5	7.92 ± 0.92	
Hg	0.083 ± 0.006	0.015 ± 0.002	0.020 ± 0.0012	0.076 ± 0.016	
Fe	8790 ± 730	12400 ± 1600	19400 ± 940	4890 ± 700	
V	20.7 ± 1.7	37.4 ± 4.4	65.2 ± 3.0	7.84 ± 0.95	
Sc	3.76 ± 0.28	6.16 ± 0.76	7.25 ± 0.42	0.90 ± 0.16	
Sr	72.6 ± 3.9	110 ± 10	121 ± 7	20.5 ± 0.2	

онную способность этих элементов в мерзлотных условиях. Обратная закономерность выявлена для Cd и Hg, у которых высокий показатель контрастности указывает на выраженную концентрацию в органогенных горизонтах почв. Это обусловлено высокой долей сорбционно-карбонатных форм кадмия в почве (до 45%) и общей подвижностью ртути в окружающей среде.

В донных отложениях отмечаются сходные закономерности в аккумуляции ТМ в зависимости от гранулометрического состава и пород питающих провинций. Для всех металлов без исключения максимальные концентрации обнаружены в тонкодисперсных отложениях, минимальные – в песчаных. Различия могут достигать одного математического порядка. Влияние подстилающих четвертичных пород на состав современных донных отложений проявляется в меньшей степени. Разброс значений содержания металлов в породах, близких по гранулометрическому составу, отличается не более, чем в 2 раза.

Анализ корреляционных зависимостей состава четвертичных пород и современных донных отложений, выполненных с использованием метода ранжированных спектров, показал следующие результаты. Подобие геохимических спектров (коэффициент корреляции Спирмена $r = 0.84-0.89$ при критическом значении $r = 0.55$) озерно-аллювиальных и аллювиально-морских отложений свидетельствует о близости геологических условий формирования пород, но разных обстановках осадконакопления. При формировании состава современных осадков различия в со-

держании металлов сглаживаются за счет перемешивания осадочного материала разного генезиса в процессе его переноса и осаждения. Так, при оценке спектров металлов на территории Берегового ЛУ современные илистые осадки в равной степени коррелируются с аллювиально-морскими ($r = 0.93$) и озерно-аллювиальными отложениями ($r = 0.91$). Илы водных объектов Южно-Парусового ЛУ также имеют близкие величины коэффициентов корреляции ($r = 0.90$ и 0.78 соответственно).

Таким образом, выполненный анализ позволяет говорить о необходимости установления регионального фона для разных гранулометрических типов отложений (табл. 5). Следует отметить, что в отличие от почв торфянистые осадки, прошедшие стадию гумификации, обогащены ТМ и по уровню содержания сопоставимы с илами.

Сравнение содержания металлов в почвах и донных осадках показало следующие особенности. Концентрация Ba, Sc, Hg, Cr, V, Fe в илах близка к аккумулятивному и срединному (для легких по составу) горизонтам почв, но уступает срединному горизонту тяжелых по составу почв. Содержание Co, Cu, Zn, Sr, Ba, Mn и Ni в илах сопоставимо с их количеством в срединном горизонте тяжелых почв. В донных осадках песчаного состава отмечается существенное снижение уровня концентрации всех элементов по сравнению с почвами.

Приведенные выше значения контрастности в почве для сидерофильных и литофильных металлов (за исключением Mn и Ni) свидетельствуют

Таблица 5. Региональный фон ТМ в донных осадках водных объектов Надым-Пур-Тазовского региона, мг/кг

Элемент	Илы, торфянистые илы (<i>n</i> = 98)	Илистые пески и алевриты (<i>n</i> = 96)	Пески (<i>n</i> = 54)
Ba	452 ± 28	339 ± 27	178 ± 23
Mn	382 ± 52	159 ± 27	50 ± 8
Zn	30.9 ± 2.7	13.6 ± 1.46	6.18 ± 0.57
Cu	8.39 ± 0.85	3.50 ± 0.36	1.79 ± 0.15
Ni	13.3 ± 1.4	4.60 ± 0.58	1.83 ± 0.25
Co	8.69 ± 1.09	2.88 ± 0.46	1.44 ± 0.22
Pb	8.82 ± 0.43	5.94 ± 0.45	3.31 ± 0.37
Cd	0.15 ± 0.02	0.055 ± 0.006	0.045 ± 0.005
Cr	37.4 ± 3.2	17.8 ± 2.2	7.66 ± 1.25
Hg	0.012 ± 0.001	<0.015	<0.015
Fe	21530 ± 2370	7580 ± 880	2670 ± 330
V	43.2 ± 3.3	20.9 ± 2.5	7.86 ± 0.82
Sc	5.51 ± 1.19	2.45 ± 0.58	1.45 ± 0.41
Sr	117 ± 23	83.1 ± 15.9	55.0 ± 12.0

ют о выраженном накоплении их в срединных горизонтах глинистого и суглинистого состава. Данный факт говорит о низкой миграционной активности этих элементов. Вероятной причиной может служить формирование криогенного термодинамического барьера на границе многолетней мерзлоты [40], закрепление их в виде гидроксидов, а также извлечение миграционно-способных форм на сорбционном барьере в тонкодисперсных отложениях [30]. Это подтверждается низкой долей подвижных форм этих металлов: так, для Fe и Cr она не превышает 3% от валового содержания. Накопление халькофильных элементов в верхних почвенных горизонтах обусловлено их высокой подвижностью: под влиянием всасывающего действия корневых систем растений (Zn и Cu) и способности к хелатогенезу (Zn, Cu, Hg, Cd, Pb).

Сравнение региональных кларков Надым-Пур-Тазовского региона с установленными средними фоновыми содержаниями микроэлементов в почвах различных районов Земли показало, что полученные величины хорошо согласуются с данными по Большеземельской тундре [15] и существенно ниже значений, приводимых для Кольского полуострова, а также скандинавских и североамериканских тундр и лесотундр [63, 64]. Как видно из табл. 4, наблюдаются существенные различия химизма почв легкого и тяжелого гранулометрического состава. Песчаные и супесчаные почвы обеднены всеми изученными ТМ, что хорошо согласуется с известными закономерностями дифференциации и накопления химических элементов в почвах и донных осадках [23, 59, 73] и подтверждается опубликованными данными [60].

ВЫВОДЫ

1. Сравнение результатов с приводимыми в литературе данными, полученными методом ИСП-МС, позволяет утверждать, что содержание металлов в почвах Надым-Пур-Тазовского региона хорошо согласуется с химическим составом почв северных регионов Европы (Большеземельская тундра, тундры и лесотундры Кольского полуострова, Финляндии и Норвегии), но уступает показателям, приводимым для тундр и лесотундр Северной Америки. Вместе с тем химический состав почв изученного региона отличается значительной контрастностью в зависимости от структуры микро- и мезокомплексов, формирующих тундровые и лесотундровые ландшафты. К основным факторам, определяющим различия в содержании микроэлементов в почвах и донных отложениях, относятся их гранулометрический состав, обусловленный характером подстилающих горных пород и исходный химический состав четвертичных отложений.

2. Максимальные концентрации большинства ТМ (Ba, Mn, Zn, Cu, Ni, Co, Cd, Cr, Fe, V) наблюдаются в аккумулятивных и срединных горизонтах, сформировавшихся на тяжелых породах. В горизонтах почв на легких по гранулометрическому составу субстратах содержание их снижается в 1.5–1.8 раза. В донных осадках эти различия выражены еще сильнее: среднее содержание в илах Fe и Mn в 11 раз, Ni – в 8.5, Co – в 6.5, Zn, Cu, Cr, V – в 5 раз выше, чем в мелкозернистых песках.

3. Ландшафты типичных и южных тундр в основном формируются на позднеплейстоценовых аллювиально-морских отложениях 3 и 4 морских террас, лесотундровые и северо-таежные – на позднеплейстоценовых озерно-аллювиальных

породах надпойменных террас разного гипсометрического уровня и голоценовых аллювиальных отложениях пойменных террас. Изучение химического состава пород показало, что относительно низкое содержание микроэлементов в озерно-аллювиальных и аллювиальных отложениях сочетается с повышенной концентрацией сидерофильных (V, Cr, Co, Ni) и халькофильных элементов (Zn, Cu, Pb) в аллювиально-морских отложениях.

4. Зависимость химического состава почв и донных осадков от четвертичных отложений подтверждается результатами факторного и спектрального анализов, которые показали высокую степень участия подстилающих пород в формировании химической структуры почв и донных осадков. Исключением стали торфяники, у которых отсутствуют достоверные статистические связи с химическим составом почвообразующих пород.

5. Специфика почвенной физико-химической миграции в условиях многолетнемерзлых пород приводит к накоплению литофильных и сидерофильных металлов в минеральном горизонте почв глинистого и тяжелосуглинистого состава с высокой контрастностью (отношение максимальной и минимальной концентраций в горизонтах почв), достигающей 8.1. Накопление халькофильных элементов, напротив, отмечается в верхних почвенных горизонтах, что обусловлено их высокой подвижностью. Контрастность содержания заметно меньше и не превышает 2.1. Аккумуляция в органогенных горизонтах в максимальной степени выражена у Cd и Hg с контрастностью 7.2 и 5.5 соответственно.

6. При разработке региональных кларков учтены существенные различия содержания ТМ в автономных и подчиненных геохимических позициях. На основе статистического анализа и метода ранжированных геохимических спектров обоснована необходимость определения регионального геохимического фона отдельно для органогенных горизонтов, двух минеральных (срединных) горизонтов почв легкого и тяжелого гранулометрического составов, а также торфяников. Минимальные значения большинства ТМ (Ba, Mn, Zn, Ni, Co, Pb, Cr, Fe, V, Sc и Sr) установлены в торфяниках, где концентрация в 2–8 раз ниже их содержания в глинистых и суглинистых срединных горизонтах. Исключение составляют Hg и Cd, содержание которых в торфяниках в 3–4 раза больше, чем в минеральных горизонтах. В донных осадках фоновые содержания рассчитаны для трех типов, охватывающих весь гранулометрический спектр отложений: илах (торфянистых илах), илистых песках (алевритах), а также в мелкозернистых песках. Полученные результаты рекомендуются использовать в локальном (производственном) мониторинге состояния и загрязнения окружающей среды на территории севера Западной Сибири.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке гранта РГО-РФФИ № 17-05-41070.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешукин Л.В.* Трансформация и формы аккумуляции металлов в тундровых почвах европейского Севера // Природные и антропогенно-измененные биохимические циклы. Тр. биогеохимической лаборатории. Т. XXI / Отв. ред. В.В. Добровольский, Н.И. Конова. М.: Наука, 1990. С. 72–83.
2. *Бакулин В.В., Козин В.В.* География Тюменской области. Екатеринбург: Сред.-Урал. кн. изд., 1996. 240 с.
3. *Бахмет О.Н.* Органофильность почвы – интегральный показатель природных условий // Экологические функции лесных почв в естественных и нарушенных ландшафтах. Мат-лы IV Всерос. научн. конф. с международ. участием по лесному почвоведению. Ч. 2. Апатиты, 2011. С. 74–77.
4. *Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976. 248 с.
5. *Брукс Р.Р.* Биологические методы поисков полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 301 с.
6. *Васильевская В.Д., Иванов В.В.* Почвы севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 225 с.
7. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 234 с.
8. *Водяницкий Ю.Н.* Соединения железа и биодegradация нефти в переувлажненных загрязненных почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1364–1374.
9. *Водяницкий Ю.Н.* Учет геохимических особенностей территории и погодных условий при нормировании тяжелых металлов в почвах // Агрохимия. 2014. № 2. С. 66–72.
10. *Водяницкий Ю.Н., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконова Е.А.* Металлы в загрязненном торфе (Западная Сибирь) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2011. Вып. 67. С. 67–79.
11. *Вострокнутов Г.А.* Современные компьютерные технологии геохимического прогнозирования // Прикладная геохимия. 2002. Вып. 3. С. 287–304.
12. *Глазовская М.А.* Критерии классификации почв по опасности загрязнения свинцом // Почвоведение. 1994. № 4. С. 110–120.
13. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 421 с.
14. *Доклад “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Ямало-Ненецком автономном округе в 2016 году”.* Салехард, 2017. 237 с.
15. *Дымов А.А., Лаптева Е.М., Калашиников А.В., Денева С.В.* Фоновое содержание тяжелых металлов, мышьяка и углеводородов в почвах Большеземельской тундры // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 4. С. 43–48.
16. *Дьяченко В.В., Матасова И.Ю.* Региональные кларки химических элементов в почвах европейской ча-

- сти юга России // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1159–1166.
17. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в почвах Западной Сибири // Почвоведение. № 11. 1987. С. 87–96.
 18. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2015. № 2. С. 7–17.
 19. Коробова Е.М. Комплексная оценка эколого-геохимического состояния техногенно трансформированных территорий // Геохимия. 2017. № 10. С. 863–874.
 20. Кукушкин С.Ю. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы при освоении нефтегазоконденсатных месторождений Севера Западной Сибири. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук РГМУ. СПб, 2017. 25 с.
 21. Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда, эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука, 1998. 112 с.
 22. Нечаева Е.Г. Ландшафтно-геохимические черты зональных подразделений долинно-таежного Обь-Иртышья // География почв и геохимия ландшафтов Сибири. Иркутск: ИГ СО РАН, 1988. С. 3–17.
 23. Опекунов А.Ю. Экологическая седиментология. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2012. 224 с.
 24. Опекунов А.Ю., Ганул А.Г. Теория и практика экологического нормирования в России. СПб: Изд-во СПб. ун-та, 2014. 332 с.
 25. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в Ямало-Ненецком автономном округе // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7, геология, география. 2012. № 4. С. 87–101.
 26. Опекунова М.Г. Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации. Дис. ... докт. геогр. наук. СПб., 2013. 402 с.
 27. Опекунова М.Г., Арестова И.Ю., Щербаков В.М., Кучеров А.В., Ганул А.Г. Тяжелые металлы в почвах Уренгойского Севера // Вестник Санкт-Петербургского ун-та, Сер. 7. 1997. Вып. 1. С. 67–76.
 28. Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю. Трансформация почв севера Западной Сибири под влиянием нефтегазодобычи // Мат-лы докл. VI съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Кн. 2. Петрозаводск, 2012. С. 121–123.
 29. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Арестова И.Ю. Оценка трансформации природной среды в районах разработки углеводородного сырья на севере Западной Сибири // Сибирский экологический журн. 2018. № 1. С. 122–138. doi 10.15372/SEJ20180111
 30. Питулько В.М. Вторичные ореолы рассеяния в криолитозоне. Л.: Недра, 1977. 197 с.
 31. Приказ департамента природно-ресурсного регулирования, лесных отношений и развития нефтегазового комплекса Ямало-Ненецкого автономного округа от 27 марта 2017 г. № 348 “Об установлении нормативов качества окружающей среды “Фоновое содержание загрязняющих веществ в снежном покрове, в донных отложениях поверхностных водных объектов, в растительности на территории Ямало-Ненецкого автономного округа”. Салехард, 2017. 24 с.
 32. Природные условия освоения Тазовского нефтегазоносного района / Отв. ред. Б.Н. Лиханов. М.: Наука, 1972. 231 с.
 33. Роль водно-болотных угодий в устойчивом развитии Севера Западной Сибири. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2001. 229 с.
 34. Свириденко С.П., Питерских А.С. Экологическое состояние почвенного покрова на территории Приуральского района Ямало-Ненецкого автономного округа // Вестник КрасГАУ. № 4. 2012. С. 67–80.
 35. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 376 с.
 36. Сорокина Е.П., Батрак И.Е., Дмитриева Н.К., Карпов П.К., Тюрин В.Н. Характеристика геохимического фона природной среды с учетом ландшафтно-геохимической структуры территории (Западная Сибирь) // Докл. межд. науч. конф. Москва–Смоленск, 2006.
 37. Сысо А.И. Общие закономерности распределения микроэлементов в покровных отложениях и почвах Западной Сибири // Сибирский экологический журн. 2004. Т. 11. № 3. С. 273–287.
 38. Сысо А.И. Закономерности распределения микроэлементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.
 39. Таргульян В.О. Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. М.: Наука, 1971. 268 с.
 40. Тентюков М.П. Особенности распределения химических элементов в мерзлых почвах // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 3. С. 100–107.
 41. Тонконогов В.Д. Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 304 с.
 42. Требования к геохимической основе государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1000000 (новая редакция). М., 2005. 28 с.
 43. Чернова О.В., Бекецкая О.В. Экологическое нормирование фоновых концентраций микроэлементов и ТМ в почвах // Современные проблемы загрязнения почв. III Международн. конф. М., 2010. С. 454–458.
 44. Чернова О.В., Бекецкая О.В. Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1102–1113.
 45. Чочиа Н.Г. Очерки по геологии севера Западно-Сибирской низменности. Л.: Гостоптехиздат, Ленингр. отд., 1960. 267 с.
 46. Экологический мониторинг Ямало-Ненецкого автономного округа. Справочник по применению

- средних региональных значений содержания контролируемых компонентов на мониторинговых полигонах при оценке состояния и уровня загрязнения окружающей среды на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. Братск, 2014. 19 с.
47. Ярошевский А.А. Кларки геосфер // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. С. 7–14.
 48. Bioremediation of petroleum-hydrocarbons in cold regions / Eds. D.M. Filler et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. XXIV. 273 p.
 49. Brown K.W., Donnelly K.C., Thomas J.C., Campbell D. Degradation of soil applied organic compounds from three petroleum wastes // Waste Manag. Res. 1985. V. 3. № 1.
 50. Carion C. Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization. European Commission. Ispra. Joint Research Centre. 2007. 306 p.
 51. Chapelle F.H., Lovley D.R. Competitive exclusion of sulfate reduction by Fe(III) reducing bacteria: A mechanism for producing discrete zones of high iron ground water // Ground Water. 1992. V. 30. P. 29–36.
 52. Determining background soil concentrations of contaminants for managing land / Envirolink Advice Grant 1251-MLDC83. New Zealand, 2013. 58 p.
 53. Dudka S., Chlopecka A. Effect of solid-phase speciation on metal mobility and phytoavailability in sludge-amended soil // Water Air Soil Pollut. 1990. V. 51. № 153.
 54. Galuszka A. A review of geochemical background concepts and an examples using data from Poland // Environ. Geol. 2007. 52. P. 861–870.
 55. Gounou A., Bousserhine N., Varrault G., Mouchel J.M. Influence of the iron reducing bacteria on the release of heavy metals in anaerobic river sediment // Water Air Soil Poll. 2010. V. 212. P. 123–139.
 56. Halbach K., Mikkelsen Ø., Berg T., Steinnes E. The presence of mercury and other trace metals in surface soils in the Norwegian Arctic. Chemosphere. 2017. V. 188. P. 567–574. doi 10.1016/j.chemosphere.2017.09.012
 57. Heemsbergen D., Warne M., McLaughlin M., Kookana R. The Australian Methodology to Derive Ecological. Investigation Levels in Contaminated Soils. CSIRO Land and Water Science Report 43/09. 2009. 75 p.
 58. IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. E-ISBN 978-92-5-108370-3.
 59. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. Boca-Raton London-New York: Taylor & Francis Group, 2011. P. 548.
 60. Kobierski M., Dibkowska-Naskret H. Local background concentration of heavy metals in various soil types formed from glacial till of the Inowroclawska plain // J. Elem. 2012. V. 4. P. 559–585. doi 10.5601/jelem.2012.17.4.02
 61. Kristin V., Joris M. Bioremediation of diesel oil-contaminated soil by composting with biowaste // Environ. Poll. 2003. V. 125. P. 361–368
 62. Myers J., Thorbjornsen K. Identifying metals contamination in soil: A geochemical approach // Soil Sediment Contam. 2004. V. 13. P. 1–16.
 63. Niskavaara H., Reimann C., Kashulina G., Chekushin V. Seasonal variability of total and easily leachable element contents in topsoils (0–5 cm) from eight catchments in the European Arctic (Finland, Norway and Russia) // Environ. Poll. 1997. T. 96. № 2. P. 261–274.
 64. Protocol 4. Determining background soil quality. CSAP Technical Review Comments. Establishing Background Concentrations in Soil. 2017. 58 p. https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/site-remediation/docs/protocols/protocol_4.pdf.
 65. Reimann C., de Caritat P. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil // Science of the Total Environment. 2017. V. 578. P. 633–648. doi 10.1016/j.scitotenv.2016.11.010
 66. Reimann C., Äyräs M., Chekushin V., Bogatyrev I., Boyd R., Caritat P., Dutter R., Finne T.E., Halleraker J.H., Jæger Ø., Kashulina G., Lehto O., Niskavaara H., Pavlov V.K., Räisänen M.L., Strand T., Volden T. Environmental geochemical atlas of the central Barents region. NGU-GTK-CKE special publication, Geological Survey of Norway (NGU), 1998. Trondheim, 745 p. ISBN 978-82-7385-176-5
 67. Reimann C., Garret R.G. Geochemical background – concept and reality // Sci. Total Environ. 2005. V. 350. P. 12–27. doi 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047
 68. Rudnick R.L., Gao S. The Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. V. 3. P. 1–64.
 69. Rubio B., Nombela M.A., Vilas F. Geochemistry of major and trace elements in sediments of Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution // Marine Poll. Bull. 2000. V. 40. P. 968–980.
 70. Shelobolina E.S., Anderson R.T., Vodyanitskii Y.N. et al. Importance of clay size minerals for Fe(III) respiration in a petroleum contaminated aquifer // Geobiology. 2004. V. 2. P. 67–76.
 71. Walker J.D. Chemical fate of toxic substances: Biodegradation of petroleum // Mar. Technol. Soc. J. 1984. V. 18. № 3. P. 73–86.
 72. Weber F.A., Hofacker A., Voegelin A., Kretzschmar R. Temperature dependence and coupling of iron and arsenic reduction and release during flooding of a contaminated soil // Environ. Sci. Technol. 2010. V. 44. P. 116–122.
 73. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. № 7. P. 1217–1232.
 74. Zhao F.J., Mcgrath S.P., Merrington G. Estimates of ambient background concentrations of trace metals in soils for risk assessment // Environ. Pollut. 2007. V. 148. P. 221–229.

Background Element Concentrations in Soils and Bottom Sediments of the North of Western Siberia

M. G. Opekunova^{a, *}, A. Yu. Opekunov^a, S. Yu. Kukushkin^a, and A. G. Ganul^a

^a*St. Petersburg State University, St. Petersburg 199178 Russia*

**e-mail: m.opekunova@mail.ru*

Background concentrations of heavy metals (Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Pb, Hg, Cd, Ba, Sr, and Sc) in soils and bottom sediments were determined for the background and anthropogenically disturbed (oil and gas extraction) areas in the north of Western Siberia on the basis of long-term studies (1993–2017). It was found that the soils are characterized by relatively low concentrations of heavy metals. The major factors affecting the variability of the chemical composition of the environmental components are the lithological and chemical composition of the parent materials and the zonal–azonal geochemical differentiation related to peat accumulation. The statistical analysis and the method of ranked geochemical spectra suggested that background element concentrations should be separately determined for organic soil horizons, for mineral (illuvial) horizons in coarse-textured and heavy-textured soils, and for peatlands. Minimum concentrations of most of the studied heavy metals were determined in peatlands: they were 2–8 times lower than the concentrations of these metals in the clayey and loamy illuvial horizons. Mercury and cadmium were the exceptions: their concentrations in the peatlands were 3–4 times higher than those in the illuvial mineral horizons. Background element concentrations in bottom sediments were separately calculated for three categories: clay and peaty clay sediments, silts, and fine-grained sands. Element concentrations in clay sediments were significantly higher than those in sandy sediments: by 11 times for Fe and Mn; by 8.5 times for Ni; by 6.5 times for Co; and by 5 times for Zn, Cu, Cr, and V. The concentrations of metals were determined by the ICP MS method. The obtained data on the background concentrations of heavy metals can be recommended for the assessment of technogenic impact on local soils and bottom sediments in the course of the environmental monitoring.

Keywords: regional geochemical background, soils, bottom sediments, oil and gas condensate deposits, Western Siberia