

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 550.4:631.4

DOI: 10.15372/GIPR20250308

Д.Н. БАЛЫКИН, Н.М. КОВАЛЕВСКАЯ, А.В. ПУЗАНОВ, С.Н. БАЛЫКИН, А.В. САЛТЫКОВ

Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия, balykindn@yandex.ru, nelleyk@mail.ru,
puzanov@iwep.ru, snbalykin@yandex.ru, salykovav@yandex.ru

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ КРИОЗЕМОВ ТЕРРИТОРИИ БОВАНЕНКОВСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ЯМАЛ)

Представлены результаты исследований по оценке элементного химического состава криоземов на территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (п-в Ямал). В связи с интенсивным освоением месторождений углеводородов растет антропогенная нагрузка на природные экосистемы криолитозоны в условиях изменяющегося климата, что может привести к изменению геохимического фона и миграции химических элементов в почвенно-растительном покрове. Определены основные физико-химические свойства и гранулометрический состав почв. Оценено валовое содержание макро- и микроэлементов K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, As, Pb, Th, U и выявлены общие закономерности их внутрипрофильного распределения. Рассчитаны средние значения кларков концентраций элементов (КК). Установлено, что в образцах почв органогенных горизонтов $КК > 1$ для Br, Cd, Ag, As, Se, Zn, Pb, Mn, Fe, Ni, Y, Zr, Sb, Cr, V, Cu, Ge. В минеральных горизонтах $КК > 1$ для Ag, Br, As, Cd, Zr, Mo, Sb. Проведен сравнительный анализ содержания элементов в почвах Бованенковского НГКМ с региональным геохимическим фоном. Выявлено, что органогенные горизонты криоземов отличаются от минеральных более высоким валовым содержанием макро- и микроэлементов. Отмечены зоны аккумуляции макро- и микроэлементов в надмерзлотных горизонтах почв. Результаты исследования показали, что содержание и характер профильного распределения элементов в почвах обусловлены гранулометрическим составом почвообразующих пород, аккумуляцией на биогеохимическом, окислительном и мерзлотном барьерах. Выявлена тесная положительная корреляция ($r = 0,8–0,9$) в минеральных горизонтах почв между: концентрациями Mn, Fe, Zn, Rb, Y, Nb, Sn, Sb, Pb, Th и содержанием физической глины; Ca, Ni, Cu, Br, Sr, Mo, Cd и органическим веществом; Ni, Cu, Nb, Sn, Sb, As, Pb, Th, Cd, Mn, Zn, Rb, Y, Pb и валовым содержанием железа.

Ключевые слова: макроэлементы; микроэлементы; валовое содержание; почвы; п-в Ямал, почвенные горизонты.

D.N. BALYKIN, N.M. KOVALEVSKAYA, A.V. PUZANOV, S.N. BALYKIN, A.V. SALTYSKOV

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
656038, Barnaul, ul. Molodezhnaya, 1, Russia, balykindn@yandex.ru, nelleyk@mail.ru,
puzanov@iwep.ru, snbalykin@yandex.ru, salykovav@yandex.ru

ELEMENTAL COMPOSITION OF CRYOZEMS OF THE TERRITORY OF THE BOVANENKOV OIL AND GAS CONDENSATE FIELD (CENTRAL YAMAL)

The article presents the results of studies on the elemental chemical composition of cryozems in the Bovanenkovo oil and gas condensate field (Yamal Peninsula). Due to the intensive development of hydrocarbon deposits the anthropogenic load on natural ecosystems of the cryolithozone is growing in the conditions of a changing climate, which can lead to a change in the geochemical background and migration of chemical elements in the soil and vegetation cover. The main physical and chemical properties and granulometric composition of the soils were determined. The total content of macro- and microelements K, Ca,

Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, As, Pb, Th, U was assessed and general patterns of their profile distribution were identified. The average values of element concentration clarkes (CC) were calculated. It was established that in the soil samples of organic horizons $CC > 1$ for Br, Cd, Ag, As, Se, Zn, Pb, Mn, Fe, Ni, Y, Zr, Sb, Cr, V, Cu, Ge. In mineral horizons, $CC > 1$ for Ag, Br, As, Cd, Zr, Mo, Sb. A comparative analysis of the element content of in the soils of the Bovanenkovo OGCF with the regional geochemical background was carried out. It was revealed that the organic horizons of cryozems differed from the mineral ones by a higher total content of macro- and microelements. Zones of macro- and micronutrient accumulation in suprapermafrost soil horizons have been identified. The results of the study showed that the content and pattern of the profile distribution of elements in soils were due to the granulometric composition of soil-forming rocks, as well as accumulation at the biogeochemical, oxidative and permafrost barriers. A close positive correlation ($r = 0.8-0.9$) was revealed in the mineral horizons of soils between: concentrations of Mn, Fe, Zn, Rb, Y, Nb, Sn, Sb, Pb, Th and the content of physical clay; Ca, Ni, Cu, Br, Sr, Mo, Cd and organic matter; Ni, Cu, Nb, Sn, Sb, As, Pb, Th, Cd, Mn, Zn, Rb, Y, Pb and the total iron content.

Keywords: macroelements, microelements, total content, soils, Yamal Peninsula, soil horizons.

ВВЕДЕНИЕ

Ямал представляет собой низменную полого-холмистую равнину, вся территория располагается в области многолетней мерзлоты мощностью около 300–400 м. Здесь залегает мощный чехол четвертичных осадочных пород, представленный слоистыми песчано-глинистыми толщами морского и озерно-аллювиального генезиса [1].

Существенный вклад в загрязнение территории Ямала при разработке месторождений углеводородов оказывает постоянное сжигание нефтяного попутного газа, а также региональный и глобальный перенос газопылевых выбросов.

Химическое загрязнение тундровых ландшафтов в результате промышленного освоения недр может привести к изменению геохимического фона и миграции химических элементов в почвенно-растительном покрове [2–5].

Такие же последствия могут возникнуть в результате изменения климатических условий. Увеличение температуры, наблюдаемое в последние десятилетия в криолитозоне Арктики, оказывает влияние на мощность многолетнемерзлых грунтов и сезонно талого слоя (СТС) [6, 7]. Содержащиеся в СТС химические элементы вовлекаются в биогеохимический круговорот.

Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение — одно из самых крупных на территории Ямала — расположено в 40 км от побережья Карского моря, в нижнем течении рек Сёяхи, Мордыахи и Надуяхи. Запасы природного газа месторождения оцениваются в 4,9 трлн м³. Бованенково-Тамбейский минерально-сырьевой центр (ПАО «Газпром») составляют Бованенковское, Восточно-Бованенковское, Харасавэйское, Малыгинское, Крузенштернское, Тамбейское месторождения с суммарными запасами газа 14 трлн м³ и текущей годовой добычей 112 млрд м³ [8].

Цель работы заключается в оценке валового содержания и особенностей внутрипрофильного распределения элементов в криоземах Ямала на территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Почвенные разрезы были заложены в августе 2017 г. на водораздельной поверхности вершины увала (разрезы № 1–3) и правобережном склоне (разрезы № 4–6) к долине р. Сёяхи в 12 км восточнее пос. Бованенково (рис. 1).

Растительный покров вершин увалов водоразделов представлен низко- и редкокустарниковыми моховыми (сфагновыми) плоскобугристыми тундрами с доминированием в кустарниковом ярусе ивы сизой (*Salix glauca* S. lanata) и меньшим участием ерника. В составе травяно-кустарничкового яруса доминирует осока арктико-сибирская (*Carex arctisibirica*), злаки (арктополевица широколистная (*Arctagrostis latifolia*), мятлик альпигенный (*Poa alpigena*). На склоне к пойме р. Сёяхи в ложбинообразных понижениях рельефа и надпойменных террасах преобладают ивняковые высококустарниковые травяно-моховые сообщества [9].

Влияние вечной мерзлоты на почвообразование проявляется в виде барьера для движения нисходящих почвенных растворов, что способствует доминированию процессов оглеения почвенной толщи, образованию глеевых и органогенных почвенных горизонтов. Основные почвообразовательные процессы: подстилкообразование, оглеение, криотурбация, криогенное оструктурирование [10].

В структуре почвенного покрова представлены: торфяная олиготрофная, (профиль № 1 ТО-Т1-Т2, мощность СТС 25 см); торфяно-криозем (профиль № 2 ТО-Т2-СР, мощность СТС 43 см); торфяно-

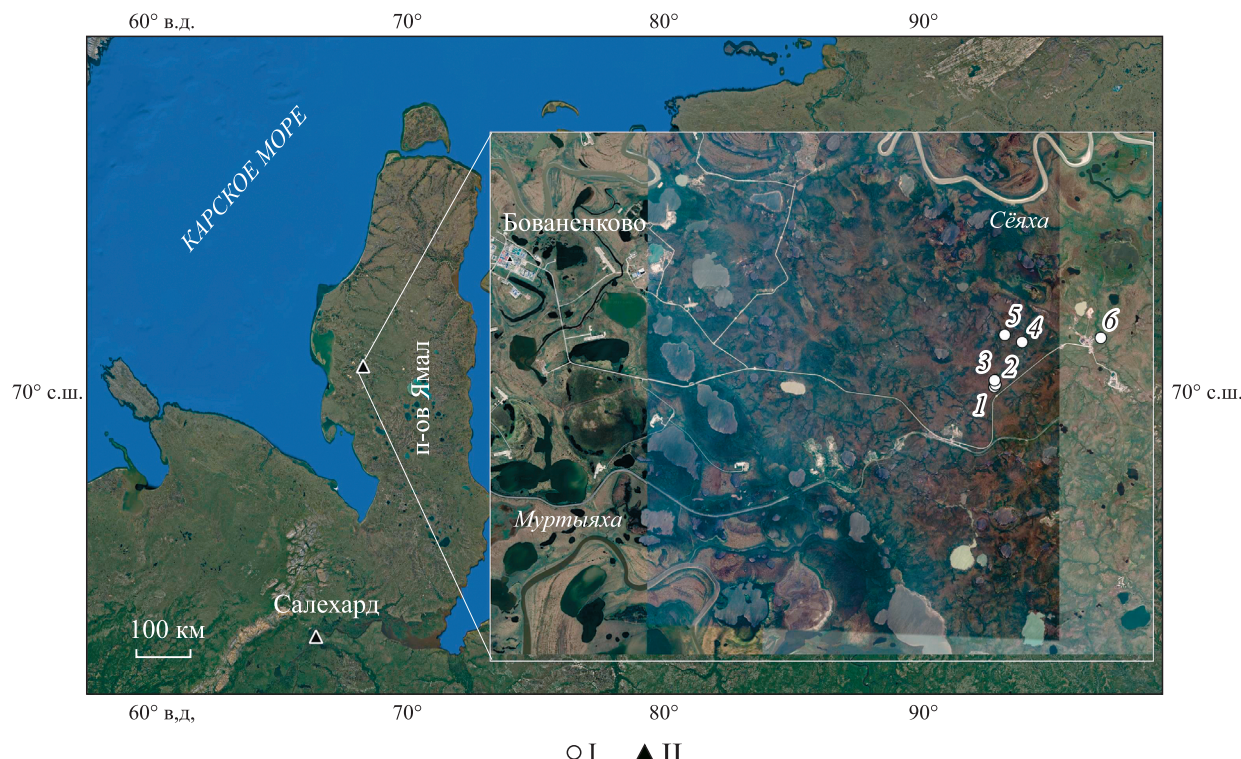


Рис. 1. Картограмма расположения почвенных разрезов на территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения.

I — почвенные разрезы: 1 — торфяная олиготрофная; 2, 3, 5, 6 — торфяно-криозем; 4 — криозем грубогумусный; II — населенные пункты.

криозем (профиль № 3 TO-CR1-CR2-C, мощность СТС 73 см); криозем грубогумусный (профиль № 4 АО-CR-C1-C2-C3-C4, мощность СТС 130 см); торфяно-криозем (профиль № 5 TO-CR1-CR2-C, мощность СТС 80 см); торфяно-криозем (профиль № 6 TO-CR1-CR2-C, мощность СТС 70 см).

В исследуемых почвах были определены основные химические и физико-химические показатели: водородный показатель (рН) почвенной вытяжки определяли потенциометрическим методом с помощью иономера рХ-150МИ; гидролитическую кислотность — методом Каппена в модификации ЦИНАО; емкость поглощения (ЕКО) — методом Бобко–Аскинази в модификации ЦИНАО; содержание гумуса и углерода — методом Тюрина в модификации Никитина; нитриты — фотометрическим методом с реактивом Грисса; нитраты — фотометрическим методом с салициловой кислотой; подвижный фосфор — методом Чирикова и Мачигина; гранулометрический состав — пипеточным методом по Качинскому [11, 12].

Валовое содержание 28 элементов (K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, As, Pb, Th, U) в почвах определено методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения на оборудовании Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и трагерцового излучения» на базе уникальной научной установки «Комплекс ВЭПП-4-ВЭПП-2000» (рентгенофлуоресцентный анализ с возбуждением синхротронным излучением) в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) (г. Новосибирск). Пределы обнаружения метода для почв (режим измерения — энергия монохроматизированного излучения 33 кэВ): Mn, Fe — 50 м.д.; Ni, Cu, Zn — 3; As, Br — 0,5; Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo — 0,35; Ag, Cd, Sn, Sb — 0,2; Pb, Th, U — 1 м.д.

Статистическая обработка данных выполнена в программах Excel и Statistica 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные физико-химические свойства тундровых почв. Верхние горизонты исследуемых почв состоят из слоя живых мхов и торфа различной степени разложения, за исключением разреза № 4 —

криозема грубогумусного. Потери при прокаливании в органогенных горизонтах исследуемых почв (Т, ТО) составляют от 50 до 90 %. В минеральных горизонтах (CR, C) содержание органического углерода составляет от <0,1 до 3,4 %. Для почв характерна сильноокислая, кислая (разрезы № 1–5) и щелочная реакция среды (разрез № 6), показатель гидролитической кислотности (Нг) составляет от 0,4 до 6,6 мг-экв/100 г почвы. Емкость поглощения (ЕКО) минеральных горизонтов почв варьирует от 2,4 до 24,8 мг-экв/100 г почвы. Содержание минеральных форм азота в минеральных горизонтах почв составляет: нитраты — от <0,1 до 51 мг/кг, нитриты — от 0,1 до 7,4, подвижный фосфор от <10 до 22,3 мг/кг. Гранулометрический состав минеральных горизонтов почв легкоглинистый (разрез № 6), легкосуглинистый (разрез № 2), супесчаный (разрез № 3), песчаный (разрезы № 4, 5) (табл. 1).

Содержание элементов в органогенных горизонтах почв. Проведенные исследования показали, что органогенные горизонты почв Бованенковского НГКМ аккумулируют многие макро- и микроэлементы, особенно Br, Cd, Ag, As, Se, Mo, Zn, Pb, Mn, Fe, Ni, Y и др. Их кларки концентраций (КК) >1 (отношение содержания элемента к кларку земной коры). Следует отметить, что содержания первых

Таблица 1

**Основные физико-химические свойства почв
территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения**

Горизонт (глубина, см)	рНв	С, %	NO ₃	NO ₂	P ₂ O ₅	Нг	ЕКО	Физическая глина, %
			мг/кг			мг-экв/100 г почвы		
Торфяная олиготрофная, профиль № 1, 70°20'00,51" с. ш., 68°46'59,71" в. д., <i>h</i> 27 м								
ТО (1–15)	4,3	89,6*	—	—	—	—	—	—
T ₁ (15–20)	4,6	85,3*	—	—	—	—	—	—
T ₂ (20–25)	4,8	80,2*	—	—	—	—	—	—
Торфяно-криозем, профиль № 2, 70°20'2,56" с. ш., 68°47'2,70" в. д., <i>h</i> 26 м								
ТО (0–10)	4,7	90,4*	—	—	—	—	—	—
T (10–21)	4,6	89,8*	—	—	—	—	—	—
CRg (21–43)	4,8	3,4	1,3	0,6	<10	6,6	10,4	23,04
Торфяно-криозем, профиль № 3, 70°20'6,03" с. ш., 68°47'0,26" в. д., <i>h</i> 26 м								
ТО (0–10)	5,0	80,9*	—	—	—	—	—	—
CR ₁ g (10–37)	5,2	3,4	2,3	1,0	<10	5,3	8,8	19,8
CR ₂ g (37–60)	5,4	0,3	7,9	2,4	21,4	1,5	4,0	23,3
Cg (60–73)	6,4	0,3	1,3	0,1	15,5	0,7	7,2	11,6
Криозем грубогумусный, профиль № 4, 70°20'38,57" с. ш., 68°48'9,79" в. д., <i>h</i> 23 м								
АО (0–9)	5,1	1,1	2,2	0,5	13,1	4,1	5,6	8,6
CR (9–33)	5,3	0,1	4,0	0,6	11,4	2,8	5,6	6,9
C ₁ (33–83)	5,7	0,1	<0,1	0,9	15,5	1,0	5,6	3,7
C ₂ (83–112)	6,1	<0,1	0,8	4,6	22,3	0,4	2,4	4,8
C ₃ g (112–120)	6,6	1,6	6,2	7,4	18,9	1,1	8,8	19,8
C ₄ g (120–130)	6,8	0,3	51,0	2,2	16,4	0,7	2,4	6,3
Торфяно-криозем, профиль № 5, 70°20'44,65" с. ш., 68°47'25,89" в. д., <i>h</i> 22 м								
ТО (0–5)	3,9	74,1*	—	—	—	—	—	—
CR ₁ g (5–20)	4,8	0,5	9,4	1,0	13,3	2,1	0,8	1,3
CR ₂ g (30–40)	5,5	0,8	3,9	3,2	10,4	1,6	13,6	6,4
Cg (70–80)	5,8	0,3	8,6	0,7	< 10	0,7	5,6	6,3
Торфяно-криозем, профиль № 6, 70°20'42,13" с. ш., 68°51'28,80" в. д., <i>h</i> 23 м								
ТО (0–4)	—	51,7*	—	—	—	—	—	—
CR ₁ g (10–20)	7,1	0,9	16,4	0,8	12,1	—	24,8	60,0
CR ₂ g (40–60)	8,8	0,8	19,6	0,7	12,5	—	20,0	57,3
Cg (60–70)	8,9	0,2	9,1	0,5	13,6	—	10,4	55,6

Примечание. Прочерк — не определяли.

* Потери при прокаливании.

четыре элемента превышают кларк земной коры, соответственно, в 77, 13, 6 и 5 раз (рис. 2). Концентрации K, Ca, Ti, Sr, Nb, Sn, Th и U ниже кларка земной коры [13]. Содержание Ti, V, Cr, Rb, Sr, Y и Zr ниже кларка почв [14] (табл. 2–4).

Валовое содержание Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Mn, Cr, V в данных горизонтах в 2–8 раз превышают уровни регионального фона почв Надым-Пур-Тазовского региона (НПТР) [15] и п-ова Ямал [16] (см. табл. 2–4).

Высокое содержание элементов в органогенных горизонтах может быть объяснено как депонирующим свойством сфагновых мхов, живых и различной степени разложения, составляющих основу органогенных горизонтов тундровых почв, так и высокой биофильностью ряда элементов: Bg (коэффициент биологического поглощения (КБП) — 100n, Zn и Se КБП — 10n и 1n), а также осаждением аэрозольных частиц, содержащих металлы, на поверхность растительного и почвенного покровов из атмосферы. Так, по данным М.П. Тентюкова, одна из причин высокого содержания железа в верхней части профиля автономных ландшафтов субарктических территорий может быть связана с осаждением железосодержащих аэрозолей из приземного атмосферного воздуха [3]. При проведении экспедиционных работ на Ямале в 1990 г. в южной подзоне субарктических тундр были выявлены аномально высокие концентрации подвижного железа — до 500–800 мг/100 г почвы [17]. Выявлено увеличение массовой концентрации цинка в атмосферных аэрозолях от северной тайги Пурской низменности (г. Тарко-Сале) к тундре (г. Самбург) [18]. Установлено также аэротехногенное поступление Cd и Pb с последующей аккумуляцией в органогенных горизонтах почв Ямала и превышение экологических нормативов в отношении Cd, Ni, Hg и As [19]. Проведенные исследования элементного состава торфов и мхов в Западной Сибири показали, что сфагновые мхи аккумулируют Cd, Pb, Co и Zn, повышенные концентрации характерны для Mn и Fe [15, 20], Rb, Ag, Cs, Ba и Au [21]. В золе растений субарктических тундр Ямала отмечаются повышенные концентрации Mn, Ba, Co, Ni [22].

Содержание и распределение элементов в минеральных горизонтах почв. В минеральных горизонтах исследуемых почв по сравнению с земной корой аккумулируются Bg, Ag, As, Cd, Zr, Mo, Sb (рис. 3).

Среднее содержание большинства макро- и микроэлементов ниже кларка почв по А.П. Виноградову, за исключением Ag, Bg, U и Pb. Содержание K, Cu, Zr, As на уровне кларка. Относительно регионального геохимического фона НПТР и п-ова Ямал в минеральных горизонтах исследуемых почв в 2 раза больше содержится Cu, Pb и Zr, на уровне фона (близкое к фоновому содержанию) — Ti, Mn, Fe, Cr, Ni, Zn и Cd (см. табл. 2–4).

Содержание микроэлементов в почвах севера Западной Сибири в значительной степени зависит от генезиса почвообразующих пород. Так, участки с преобладанием аллювиально-морских отложений тяжелого гранулометрического состава морских террас определяют повышенное содержание как сидерофильных (V, Cr, Co, Ni), так и халькофильных (Zn, Cu, Pb) элементов [15, 23].

В исследованных нами почвах с увеличением содержания физической глины повышалось и валовое содержание элементов, что подтверждается значимыми коэффициентами положительной корреляции. Тесная положительная корреляция ($r = 0,8–0,9$) выявлена между: содержанием физической глины и концентрациями Mn, Fe, Zn, Rb, Y, Nb, Sn, Sb, Pb, Th; между содержанием органического вещества в пересчете на углерод и концентрациями Ca, Ni, Cu, Br, Sr, Mo, Cd.

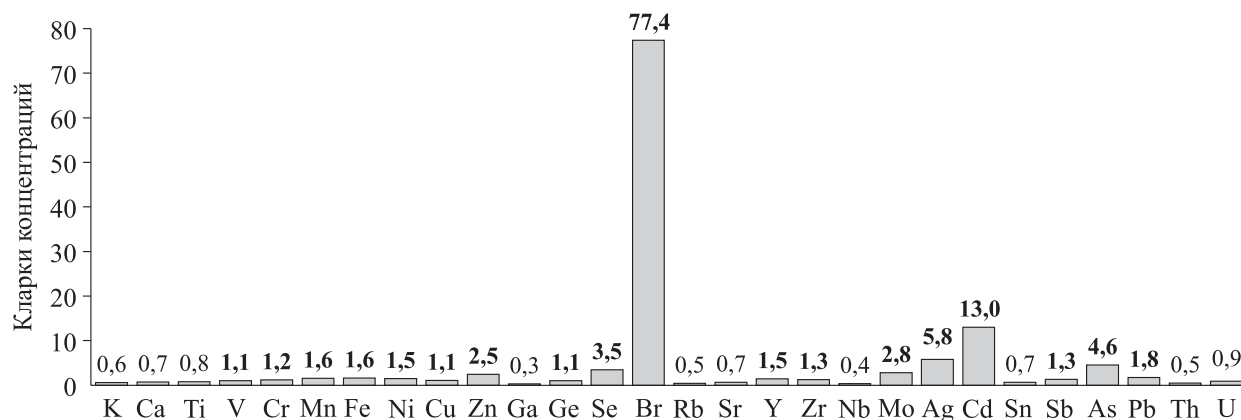


Рис. 2. Кларки концентраций элементов в органогенных горизонтах почв.

Полужирным шрифтом выделены КК > 1.

Таблица 2

Валовое содержание элементов в почвах территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения

Горизонт (глубина, см)	K	Ca	Ti	Mn	Fe	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Ga
%											
Торфяная олигогрозная, профиль № 1, 70°20'00,51" с. ш., 68°46'59,71" в. д., h 27 м											
ТО (1–15)	3,49	3,77	0,486	0,618	1,68	65,0	28,5	38,0	63,0	590	9,6
T ₁ (15–20)	1,32	3,04	0,469	0,119	20,40	184,0	201,0	102,0	40,0	271	5,3
T ₂ (20–25)	0,97	2,20	0,496	0,053	4,81	113,0	85,0	148,0	38,0	62	4,4
Торфяно-криозем, профиль № 2, 70°20'2,56" с. ш., 68°47'2,70" в. д., h 26 м											
ТО (0–10)	1,58	2,70	0,267	0,063	10,10	85,0	184,0	122,0	66,0	297	3,6
T (10–21)	0,77	2,36	0,373	0,031	7,48	160,0	97,0	137,0	52,2	39,7	4,8
CR _g (21–43)	1,00	0,37	0,379	0,016	1,58	46,9	82,0	17,2	24,7	35,3	8,8
Торфяно-криозем, профиль № 3, 70°20'6,03" с. ш., 68°47'0,26" в. д., h 26 м											
ТО (0–10)	1,23	1,35	0,224	0,073	8,07	52,4	53,3	56,0	60,0	84	3,5
CR _{1g} (10–37)	1,00	0,35	0,239	0,016	1,49	24,5	33,9	12,9	18,0	24,1	7,9
CR _{2g} (37–60)	1,72	0,53	0,473	0,033	1,62	57,0	20,6	17,4	21,6	29,9	6,0
Cg (60–73)	1,15	0,46	0,229	0,014	0,99	24,3	32,2	31,7	13,2	24,2	6,2
Криозем грубогумусный, профиль № 4, 70°20'38,57" с. ш., 68°48'9,79" в. д., h 23 м											
АО (0–9)	1,34	0,35	0,271	0,017	0,68	37,6	9,52	6,9	15,0	21,3	5,1
CR (9–33)	1,25	0,40	0,250	0,019	1,04	58,0	22,3	11,7	6,3	22,1	7,7
C ₁ (33–83)	1,37	0,40	0,164	0,014	0,65	45,5	16,8	9,0	17,4	17,6	6,7
C ₂ (83–112)	1,34	0,37	0,146	0,009	0,59	23,7	19,9	0,6	8,4	15,6	4,3
C _{3g} (112–120)	1,67	0,75	0,465	0,070	2,68	72,0	44,5	34,8	48,5	57	9,9
C _{4g} (120–130)	2,19	0,76	0,361	0,023	1,39	64,0	41,9	16,9	25,0	29,6	9,1
Торфяно-криозем, профиль № 5, 70°20'44,65" с. ш., 68°47'25,89" в. д., h 22 м											
ТО (0–5)	1,07	0,91	0,311	0,035	4,62	64,0	79,0	27,7	35,4	114	5,8
CR _{1g} (5–20)	1,15	0,28	0,212	0,009	0,69	23,4	6,1	7,7	8,4	17	4,4
CR _{2g} (30–40)	1,17	0,35	0,245	0,012	1,11	40,7	96,0	10,2	18,5	18,5	6,8
Cg (70–80)	1,63	0,40	0,205	0,020	1,24	48,7	40,9	15,1	10,8	20,8	5,7
Торфяно-криозем, профиль № 6, 70°20'42,13" с. ш., 68°51'28,80" в. д., h 23 м											
ТО (0–4)	1,59	1,25	0,350	0,284	4,13	36,5	77,0	62,0	61,0	179	10,1
CR _{1g} (10–20)	1,26	0,39	0,347	0,064	3,16	56,0	79,0	32,7	38,7	64	8,8
CR _{2g} (40–60)	1,64	0,55	0,425	0,061	3,45	64,0	88,0	29,6	31,5	59	8,8
Cg (60–70)	1,34	0,44	0,390	0,056	3,29	57,0	81,0	33,2	36,8	68	10,3
ТОх (n = 8)	1,5±0,3	2,2±0,3	0,372±0,03	0,16±0,07	7,6±2	94,9±18,7	100,6±21,4	86,5±16,4	51,9±4,3	204,5±64,4	5,8±0,9
Мх (n = 16)	1,4±0,07	0,4±0,03	0,3±0,03	0,03±0,005	1,6±0,2	46,5±4,0	44,7±7,6	18,7±2,8	21,86±3,2	33,5±4,8	7,3±0,4
Кл	1,36	1,37	0,46	0,08	3,8	100	200	40	20	50	17
Кзк	2,50	2,96	0,450	0,100	4,65	90	83	58,0	47,0	83	19,0
РГФ [15]	—	—	—	0,0375 (0,0339)	1,3 (2,2)	25 (60)	20,6 (42)	12 (13)	8,68 (8,7)	36,5 (31)	—
РГФ [25]	—	—	0,42	0,0370	—	87	—	26	13	25	—

Примечание. ТОх — среднее содержание в органических горизонтах почв; Мх — среднее содержание в минеральных горизонтах почв; н/о — не обнаружено; прочерк — нет данных; Кл — Кларк почв по А.П. Виноградову [14]; Кзк — Кларк верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову [13]; РГФ [15] — региональный геохимический фон почв Надым-Пур-Тазовского региона ЯНАО, органические горизонты почв (минеральные) [15]; РГФ [25] — региональный геохимический фон почв п-ва Ямал и юга Тазовского п-ова ЯНАО [25].

Таблица 3

Валовое содержание элементов в почвах территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения

Горизонт (глубина, см)	Ge	Se	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd
мг/кг											
Торфяная олиготрофная, профиль № 1, 70°20'00,51" с. ш., 68°46'59,71" в. д., h 27 м											
ТО (1–15)	1,47	1,52	260,0	144,0	246	14,4	223	8,6	4,21	0,37	1,72
T ₁ (15–20)	н/о	н/о	287,0	43,5	224	19,2	136	5,8	4,32	0,50	2,81
T ₂ (20–25)	н/о	н/о	101,0	40,0	263	42,1	244	10,3	2,26	0,29	1,39
Торфяно-криозем, профиль № 2, 70°20'2,56" с. ш., 68°47'2,70" в. д., h 26 м											
ТО (0–10)	н/о	н/о	184,0	78,0	240	24,6	104	4,5	3,36	0,22	2,38
T ₂ (10–21)	н/о	н/о	161,0	35,4	256	48,8	155	8,3	2,11	0,44	1,35
CR _g (21–43)	1,25	н/о	7,6	58,0	182	18,4	282	1,4	1,79	0,22	н/о
Торфяно-криозем, профиль № 3, 70°20'6,03" с. ш., 68°47'0,26" в. д., h 26 м											
ТО (0–10)	н/о	1,14	107,0	71,0	222	27,8	132	5,3	4,80	0,48	1,62
CR _{1g} (10–37)	0,90	н/о	10,6	47,7	151	15,1	400	8,2	1,30	0,39	н/о
CR _{2g} (37–60)	н/о	н/о	8,4	59,0	179	12,9	222	7,3	0,68	0,64	0,20
C _g (60–73)	н/о	н/о	7,5	49,6	165	9,5	159	7,5	0,89	0,25	0,40
Криозем грубогумусный, профиль № 4, 70°20'38,57" с. ш., 68°48'9,79" в. д., h 23 м											
АО (0–9)	н/о	н/о	18,4	57,0	163	7,0	230	7,6	1,64	0,62	н/о
CR ₁ (9–33)	1,83	н/о	16,0	49,2	136	8,5	347	6,4	1,13	0,36	0,27
C ₁ (33–83)	1,46	н/о	10,3	63,0	201	10,9	425	5,9	2,00	0,52	0,39
C ₂ (83–112)	1,16	н/о	7,1	51,5	168	8,3	253	4,4	1,53	0,42	0,35
C _{3g} (112–120)	н/о	н/о	11,1	78,0	232	23,6	266	11,3	1,81	0,18	н/о
C _{4g} (120–130)	н/о	н/о	18,9	66,0	224	9,4	148	6,8	0,86	0,26	0,29
Торфяно-криозем, профиль № 5, 70°20'44,65" с. ш., 68°47'25,89" в. д., h 22 м											
ТО (0–5)	н/о	н/о	140,0	43,0	231	28,7	326	8,7	2,08	0,60	1,13
CR _{1g} (5–20)	2,10	н/о	12,3	55,0	161	6,9	134	3,4	0,92	0,43	н/о
CR _{2g} (30–40)	1,38	н/о	7,8	59,0	185	11,6	411	5,4	1,83	0,83	0,47
C _g (70–80)	н/о	н/о	10,3	60,0	171	10,2	313	9,1	1,37	0,35	0,20
Торфяно-криозем, профиль № 6, 70°20'42,13" с. ш., 68°51'28,80" в. д., h 23 м											
ТО (0–4)	н/о	н/о	60,0	88,0	222	29,9	423	9,2	1,86	0,36	1,17
CR _{1g} (10–20)	н/о	н/о	5,3	87,0	160	25,0	476	12,1	1,21	0,19	н/о
CR _{2g} (40–60)	н/о	н/о	7,3	92,0	165	22,9	178	13,6	0,74	0,34	н/о
C _g (60–70)	н/о	н/о	5,2	89,0	165	23,6	193	12,9	0,76	н/о	н/о
ТОх (n = 8)	–	–	162,5±27,8	67,8±12,9	238±5,6	29,4±3,9	217,8±39,0	7,5±0,7	3,1±0,4	0,4±0,04	1,7±0,2
Мх (n = 16)	–	–	10,3±1,0	63,8±3,6	175,5±6,2	14,0±1,63	277,3±26,9	8,3±0,7	1,3±0,1	0,4±0,04	0,3±0,03
Кп	5	0,01	5	100	300	50	300	–	4	0,1	0,5
Кзк	1,4	0,0005	2,1	150,0	340	20,0	170	20,0	1,10	0,07	0,13
РГФ [25]	–	–	–	–	–	–	120	–	–	–	0,41

Примечание. ТОх — среднее содержание в органических горизонтах почв; Мх — среднее содержание в минеральных горизонтах почв; н/о — не обнаружено; прочерк — нет данных; Кп — Кларк почв по А.П. Виноградову [14]; Кзк — Кларк верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову [13]; РГФ [25] — региональный геохимический фон почв п-ва Ямал и юга Тазовского п-ова ЯНАО [25].

Таблица 4

Валовое содержание элементов в почвах территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения

Горизонт (глубина, см)	Sn	Sb	As	Pb	Th	U
мг/кг						
Торфяная олиготрофная, профиль № 1, 70°20'00,51" с. ш., 68°46'59,71" в. д., <i>h</i> 27 м						
ТО (1–15)	1,38	1,00	н/о	28,1	6,2	2,3
T ₁ (15–20)	2,52	0,85	10,2	45,6	3,2	1,3
T ₂ (20–25)	1,08	0,49	6,9	15,1	11,0	2,2
Торфяно-криозем, профиль № 2 70°20'2,56" с. ш., 68°47'2,70" в. д., <i>h</i> 26 м						
ТО (0–10)	1,96	0,66	н/о	41,4	2,7	1,7
T (10–21)	0,80	н/о	9,4	13,7	11,5	2,5
CR _г (21–43)	1,82	0,26	н/о	14,3	5,7	1,9
Торфяно-криозем, профиль № 3, 70°20'6,03" с. ш., 68°47'0,26" в. д., <i>h</i> 26 м						
ТО (0–10)	2,06	0,36	6,0	26,2	5,5	н/о
CR _{1г} (10–37)	1,12	0,43	4,5	11,5	5,6	3,8
CR _{2г} (37–60)	0,74	н/о	н/о	11,5	5,2	1,0
C _г (60–73)	1,35	н/о	н/о	11,9	2,7	н/о
Криозем грубогумусный, профиль № 4, 70°20'38,57" с. ш., 68°48'9,79" в. д., <i>h</i> 23 м						
АО (0–9)	0,70	0,38	2,5	12,3	2,4	н/о
CR ₁ (9–33)	0,33	н/о	2,7	12,0	3,6	н/о
C ₁ (33–83)	0,87	н/о	2,9	11,0	2,9	2,8
C ₂ (83–112)	0,55	н/о	1,4	11,4	1,9	н/о
C _{3г} (112–120)	1,51	0,55	13,2	16,6	6,6	н/о
C _{4г} (120–130)	0,95	н/о	5,3	15,0	1,9	н/о
Торфяно-криозем, профиль № 5, 70°20'44,65" с. ш., 68°47'25,89" в. д., <i>h</i> 22 м						
ТО (0–5)	1,92	0,76	н/о	28,1	5,1	1,0
CR _{1г} (5–20)	0,42	н/о	н/о	12,6	1,1	1,4
CR _{2г} (30–40)	0,74	0,30	3,9	13,8	3,5	3,3
C _г (70–80)	0,79	н/о	4,1	12,8	4,0	1,6
Торфяно-криозем, профиль № 6, 70°20'42,13" с. ш., 68°51'28,80" в. д., <i>h</i> 23 м						
ТО (0–4)	2,03	0,55	6,3	28,5	7,5	4,9
CR _{1г} (10–20)	2,89	0,78	9,3	17,2	9,8	2,2
CR _{2г} (40–60)	3,14	1,17	6,2	19,0	7,2	н/о
C _г (60–70)	2,26	1,02	9,4	17,1	6,8	н/о
ТОх (<i>n</i> = 8)	1,7±0,2	0,6±0,08	7,7±0,8	28,3±3,9	6,6±1,1	2,3±0,5
Мх (<i>n</i> = 15)	1,3±0,2	0,6±0,1	5,5±1,0	13,8±0,6	4,4±0,6	2,3±0,3
Кп	10	0,9	5	10	6	1
Кзк	2,50	0,50	1,7	16,0	13,0	2,5
РГФ [15]	—	—	—	13,4 (9,9)	—	—
РГФ [25]	—	—	—	6,1	—	—

Примечание. ТОх — среднее содержание в органогенных горизонтах почв; Мх — среднее содержание в минеральных горизонтах почв; н/о — не обнаружено; прочерк — нет данных; Кп — Кларк почв по А.П. Виноградову [14]; Кзк — Кларк верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову [13]; РГФ [15] — региональный геохимический фон почв Надым-Пур-Тазовского региона ЯНАО, органогенные горизонты почв (минеральные) [15]; РГФ [25] — региональный геохимический фон почв п-ова Ямал и юга Тазовского п-ова ЯНАО [25].

Максимумы содержания элементов были установлены в надмерзлотных горизонтах почв CR, C: в профиле торфяно-криозема супесчаного (профиль № 3) на глубине 37–60 см; в профиле криозема грубогумусного песчаного (профиль № 4) на глубине 112–120 см (горизонт C3); в профиле торфяно-криозема (профиль № 5) на глубине 30–80 см; в профиле торфяно-криозема (профиль № 6) на глубине 40–70 см (см. табл. 2). Аккумуляция элементов в средней и нижней частях профиля исследованных почв может быть связана с изменением гранулометрического состава почвенных горизонтов, что ярко выражено в криоземе грубогумусном песчаном (профиль № 4), сменой окислительно-восстановительных условий, влиянием процессов криотурбации, а также наличием подстилающей мерзлоты.

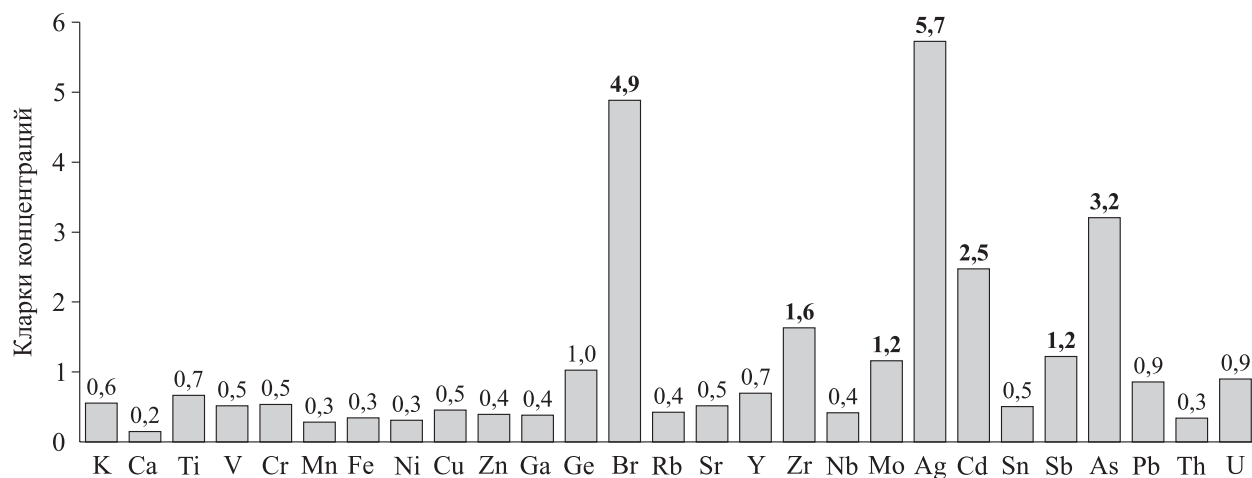


Рис. 3. Кларки концентраций элементов в минеральных горизонтах почв.

Полужирным шрифтом выделены $KK > 1$.

Установлена тесная положительная корреляция между валовым содержанием железа и концентрациями Ni, Cu, Nb, Sn, Sb, As, Pb, Th, Cd, Mn, Zn, Rb, Y, Pb ($r = 0,8-0,9$) в минеральных горизонтах почв, что связано с тем, что на железомарганцевых конкрециях происходит аккумуляция многих элементов [3].

Проведенный факторный анализ выделил несколько групп элементов. При анализе были выбраны два фактора, определяющих закономерности формирования элементного состава минеральных горизонтов почв (рис. 4). На графике хорошо выделяется большая группа элементов (от Sb до Fe) в области значимых значений факторной нагрузки (0,6–1,0) первого фактора (Factor 1), на распределение которых оказывает влияние гранулометрический состав почв (50 % варьирования). В области значимых значений второго фактора (Factor 2) оказались Br, K и Ca. На распределение этих элементов оказывает влияние органическое вещество почв (15 % варьирования). Распределение в минеральных горизонтах почв U и Zr, вероятно, связано с минералогическим составом. U встречается в качестве примеси в минералах циркона [24].

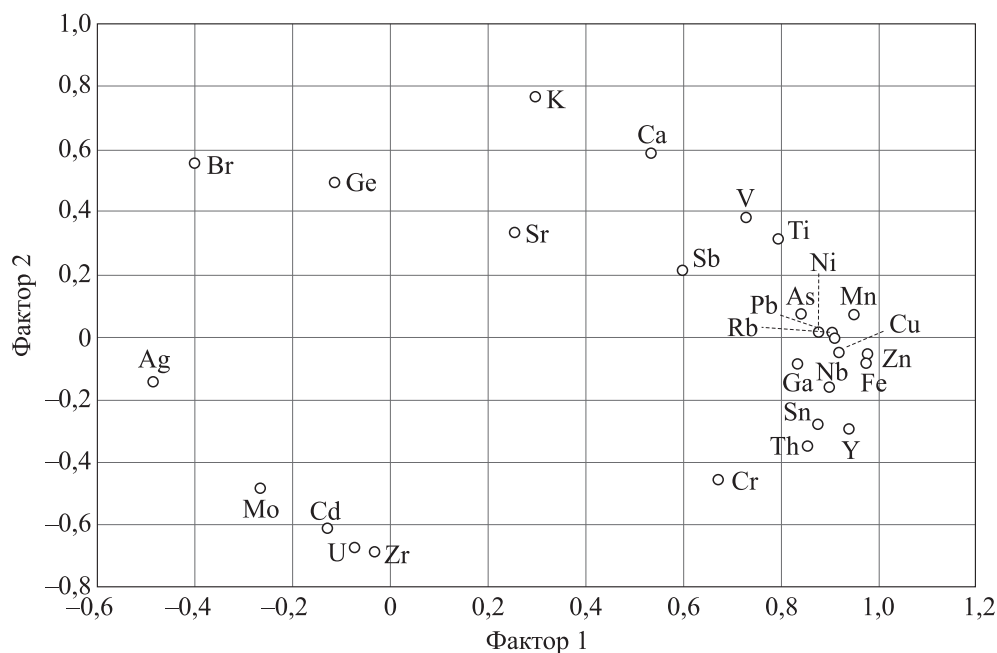


Рис. 4. Диаграмма факторных нагрузок содержания элементов в почвах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования элементного химического состава криоземов Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения показали значительное отличие по содержанию элементов в органических и минеральных горизонтах почв. Более высокое валовое содержание Br, Cd, Ag, As, Se, Mo, Zn, Pb, Mn, Fe, Ni, Y и др. в верхних горизонтах почв связано с депонирующим свойством растительного покрова, основу которого составляет сфагновый мох и торфяные отложения.

Среднее значение кларков концентраций (КК) > 1 в образцах почв органических горизонтов составляют: Br — 77,4; Cd — 13,0; Ag — 5,8; As — 4,6; Se — 3,5; Zn — 2,5; Pb — 1,8; Mn, Fe — 1,6; Ni, Y — 1,5; Zr, Sb — 1,3; Cr — 1,2; V, Cu, Ge — 1,1.

Среднее значение кларков концентраций (КК) > 1 в образцах почв минеральных горизонтов составляют: Ag — 5,7; Br — 4,9; As — 3,2; Cd — 2,5; Zr — 1,6; Mo, Sb — 1,2.

Среднее валовое содержание Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Mn, Cr, V, Zr в исследуемых почвах в 2–8 раз превышает региональный фон Надым-Пур-Тазовского региона и п-ова Ямал.

Уровни валового содержания макро- и микроэлементов в почвах и характер их профильного распределения обусловлен составом почвообразующих пород, аккумуляцией на биогеохимическом, окислительном и мерзлотном барьерах, что подтверждается результатами корреляционного и факторного анализов.

В связи с увеличивающейся антропогенной нагрузкой на природные экосистемы при освоении нефтегазоконденсатных месторождений в криолитозоне России в условиях изменяющегося климата существует необходимость в актуализации полученных результатов исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (FUFZ-2021-0003) при финансовой поддержке Российского центра освоения Арктики (г. Салехард, Россия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. — М.: Изд-во Ин-та криосферы Земли СО РАН, 2007. — 206 с.
2. Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Арабский А.К. Риск загрязнения почв тяжелыми металлами через газопылевые выбросы // Проблемы анализа риска. — 2019. — Т. 16, № 1. — С. 42–49. — DOI: 10.32686/1812-5220-2019-16-42-49
3. Тентюков М.П. Геохимия ландшафтов равнинных тундр (на примере Ямала и Большеземельской тундры). — Сыктывкар: Изд-во Ин-та биологии Коми научного центра Уро РАН, 2010. — 260 с.
4. Halbach K., Mikkelsen III., Berg T., Steinnes E. The presence of mercury and other trace metals in surface soils in the Norwegian Arctic // Chemosphere. — 2017. — N 188. — P. 567–574.
5. Aslam S.N., Huber C., Asimakopoulou A.G., Steinnes E., Mikkelsen III. Trace elements and polychlorinated biphenyls (PCBs) in terrestrial compartments of Svalbard, Norwegian Arctic // Science of the Total Environment. — 2019. — N 685. — P. 1127–1138.
6. Анисимов О.А., Жирков А.Ф., Шерстюков А.Б. Современные изменения криосферы и природной среды в Арктике // Арктика. XXI век. Естественные науки. — 2015. — № 2. — С. 24–47.
7. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. — СПб.: Научное издание, 2022. — 124 с.
8. Программа лицензирования участков недр углеводородного сырья в Арктической зоне Российской Федерации до 2035 года, ресурсная база которых потенциально может обеспечить загрузку Северного морского пути [Электронный ресурс]. — https://www.mnr.gov.ru/docs/ofitsialnye_dokumenty/prikaz_minprirody_rossii_ot_09_06_2023_357_/?ysclid=lvraffjn7501876897 (дата обращения 22.04.2024).
9. Московченко Д.В. Особенности многолетней динамики растительности Бованенковского месторождения (полуостров Ямал) // Вестн. Тюмен. ун-та. Сер. Экология и природопользование. — 2013. — № 12. — С. 57–66.
10. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под общ. ред. С.А. Шоба. — М.: Астрель: АСТ Москва, 2011. — 632 с.
11. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. — 487 с.
12. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А.В. Соколова. — М.: Наука, 1975. — 655 с.
13. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2015. — № 2. — С. 7–17.
14. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. — М.: Логос, 2000. — 627 с.

15. **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.
16. **Московченко Д.В., Романенко Е.А.** Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья // Бюлл. Почв. ин-та имени В.В. Докучаева. — 2020. — Вып. 103. — С. 51–84. — DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-51-84
17. **Дедков В.С.** Почвы равнины Ямала. Почвенный покров водоразделов // Природа Ямала. — Екатеринбург: УИФ «Наука», 1995. — С. 103–121.
18. **Купенюгий К.П., Купенюгий П.К.** Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сиб. экол. журн. — 2000. — № 1. — С. 11–19.
19. **Алексеев И.И., Динкелакер Н.В., Орипова А.А., Семьина Г.А., Морозов А.А., Абакумов Е.В.** Оценка экотоксикологического состояния почв полярного Урала и южного Ямала // Гигиена и санитария. — 2017. — Т. 96, № 10. — С. 941–945. — DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-10-941-945
20. **Московченко Д.В.** Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природ. ресурсы. — 2006. — № 1. — С. 63–67.
21. **Межибор А.М., Большунова Т.С.** Биогеохимическая характеристика сфагновых мхов и эпифитных лишайников в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области // Изв. Томск. политех. ун-та. — 2014. — Т. 325, № 1: Ресурсы планеты. — С. 205–213.
22. **Башкин В.Н.** Биогеохимические циклы в тундровых экосистемах импактных зон газовой индустрии // Геохимия. — 2017. — № 10. — С. 954–966.
23. **Московченко Д.В.** Экогеохимия нефтедобывающих районов Западной Сибири. — Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2013. — 260 с.
24. **Каулина Т.В., Лялина Л.М., Нерович Л.И., Аведисян А.А., Ильченко В.Л., Бочаров В.Н., Ниткина Е.А.** Процессы гидротермального изменения в цирконе как отражение геохимии урана в породах (на примере уранового рудопроявления Скальное Лицевского района Кольского полуострова) // Вестн. Кольск. науч. центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 54–63.
25. **Московченко Д.В.** Геохимия ландшафтов севера Западно-Сибирской равнины: структурно-функциональная организация вещества геосистем и проблемы экодиагностики: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 2010. — 33 с.

Поступила в редакцию 16.07.2024

После доработки 21.11.2024

Принята к публикации 21.05.2025