

Воздействие предприятий Кольской ГМК на почвы и растения

А. И. СЫСО¹, Ю. В. ЕРМОЛОВ¹, Е. Г. ЗИБЗЕЕВ², Т. И. СИРОМЛЯ¹, С. А. ХУДЯЕВ¹, А. С. ЧЕРЕВКО¹

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2

²Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
630090, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101
E-mail: syso@mail.ru

Статья поступила 24.10.2024

После доработки 02.12.2024

Принята к печати 11.12.2024

АННОТАЦИЯ

Изучено изменение свойств и состава почв, разнообразия видов растений ценотических комплексов в зонах на разном удалении от предприятий Кольской ГМК в г. Мончегорске и пгт. Никель. Установлено, что в импактных зонах воздействия почвы максимально насыщены Ni, Cu, Co, а отношения подвижных Cu и Ni к Ca и Mg в поверхностных органогенных горизонтах указывают на их фитотоксичность. Растения здесь несут морфологические признаки кислотного повреждения, а их видовое разнообразие минимально. Обосновано предположение, что высокое содержание Ni, Cu, Co, Cr в почвах импактных зон может быть обусловлено не только техногенным загрязнением, но и влиянием природных геохимических аномалий над рудными месторождениями, к которым приурочены предприятия Кольской ГМК. Вблизи них сформировались техногенные геохимические аномалии, при удалении от которых в почвах снижается содержание и подвижность Ni, Cu, Co, Cr, а в фитоценозах возрастает видовое разнообразие растений. Обнаружены слабые и неоднозначные корреляционные связи между биоразнообразием растений и свойствами почв, статистическая значимость которых доказана только с Cu и Ni в почвах.

Ключевые слова: тяжелые металлы, загрязнение, почвы, растения, фитоценоз, ценотическое разнообразие, Кольский полуостров.

ВВЕДЕНИЕ

Недра Кольского полуострова содержат месторождения разных руд [Когарко, 2021], служащих источниками минерального сырья для горнорудной промышленности Мурманской области. К ним относятся месторождения сульфидных медно-никелевых руд, длительно перерабатывавшиеся горно-металлургическими комбинатами (ГМК) “Североникель” в г. Мончегорске и ГМК “Печенганикель” в г. Запо-

лярном и пос. Никель. В 1998 г. на базе ГМК “Североникель” и ГМК “Печенганикель” была создана Кольская ГМК, продолжившая добычу руд и производство цветных металлов, ставшая никелерафинировочным центром компании ПАО “ГМК “Норильский никель”.

Техногенные газопылевые выбросы названных ГМК с высокими концентрациями SO₂, Ni, Cu, Co многие годы оказывали влияние на экосистемы не только Мурманской обла-

сти, но и сопредельных территорий Финляндии и Норвегии. Это нашло отражение в изменении физических и физико-химических свойств почв, их химического и биологического состава, в биоразнообразии и элементном химическом составе (ЭХС) растений [Reimann, Caritat, 2005; Paton et al., 2006; Копчик и др., 2016; Лянгузова и др., 2016; Кашулина, 2017; Баркан, Лянгузова, 2018а, б].

На основе выявленных зависимостей кислотности, общего содержания и концентрации подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) и других химических элементов, состава и численности микроорганизмов в поверхностном органогенном горизонте О почв от удаления от предприятий ГМК были обоснованы их зоны воздействия на экосистемы. На юг и юго-запад от ГМК “Североникель” на расстоянии 0,5–3,0 км выделена зона сильного воздействия, 5–25 км – зона среднего воздействия, 25–50 км – зона слабого воздействия, а фоновая – на удалении более 50 км [Евдокимова и др., 2011]. Аналогично по градиенту уменьшения интенсивности загрязнения и фитотоксичности почв выделены на юго-запад от ГМК “Печенганикель”: до 3 км – зона сильного воздействия, до 16 км – среднего воздействия, до 25–30 км – слабого воздействия [Евдокимова и др., 2014].

Произошедшее многократное сокращение предприятиями Кольской ГМК выбросов диоксида серы и ТМ хотя и уменьшило ожоги растений в зоне сильного воздействия, но не снизило высокую концентрацию Ni, Cu, Co в органогенном горизонте почв и их фитотоксичность, оцениваемую по отношениям подвижных форм химических элементов – $(Ca + Mg)/Cu$ и $(Ca + Mg)/Ni$ [Евдокимова, 1995; Евдокимова и др., 2011].

Установлено, что с сокращением выбросов предприятий и проведением мероприятий по охране окружающей среды в почвах содержание ТМ в целом снижается, но остается высоким в поверхностном горизонте О. В нем концентрации Ni, Cu, Co, Cd, Pb существенно выше, чем в иллювиальном горизонте В. В почвах подвижность ТМ разная: V, Cr, Fe – менее 1 %, Co и Ni – до 10 %, Cu и Pb – до 20 %, Zn, Mn, Cd – более 20 % [Елсукова и др., 2019].

Выявлено, что широкое варьирование концентрации ТМ в органогенном горизонте подзолов на пробных площадках может служить

причиной необнаружения достоверной связи между содержанием Ni, Cu, Co в почве и расстоянием от источника загрязнения [Баркан, Лянгузова, 2018а, б].

В импактных зонах воздействия ГМК отмечено широкое варьирование нарушения экосистем – от техногенных пустошей до умеренного повреждения. Выявлена несогласованность состояния экосистем от уровня концентрации Ni, Cu, Co в верхних органогенных слоях почв и большая зависимость их состояния от условий увлажнения и других факторов жизни растений. Факт выживания растений при экстремальных техногенных нагрузках и уровнях концентраций ТМ в почвах назван заслуживающим детального изучения [Кашулина, 2017].

Актуальность таких исследований обусловлена недостаточной изученностью зависимости биоразнообразия и продуктивности растений от свойств и состава почв, выявленными в лесных экосистемах связями между растениями и почвами, показателями их плодородия – pH, соотношения C : N, доступных растениям Ca, Mn и других элементов питания [Лукина и др., 2010].

В настоящее время ПАО “ГМК “Норильский никель” в рамках реализации Серной программы и мероприятий по улучшению экологической ситуации в регионе закрыл плавильный цех в пгт. Никель в 2020 г. и Металлургический цех в г. Мончегорске в 2021 г. Названные мероприятия и перевод производства на современные технологии снизили техногенные выбросы, что должно было уменьшить их негативное воздействие на окружающую среду и положительно сказаться на состоянии наземных экосистем, в том числе почв и растений.

В связи с этим в 2022 г. в рамках Большой научной экспедиции СО РАН были проведены экосистемные исследования по изучению и комплексной оценке биоразнообразия, экологического состояния и ЭХС растений, свойств и состава почв экосистем на разном удалении от предприятий Кольской ГМК в г. Мончегорске, г. Заполярном и пгт. Никель.

В результате исследования получены новые для науки и практики данные о состоянии почв и растений в разных зонах воздействия предприятий Кольской ГМК. Они могут представлять интерес для экологической оценки экосистем в этих зонах и разработки

мер по восстановлению нарушенных земель и экосистем.

Цель и задачи настоящей статьи состоят в оценке изменений на разном удалении от предприятий Кольской ГМК состава и свойств почв, экологического состояния и разнообразия видов растений ценотических комплексов, воздействия на них природных и техногенных факторов, зависимости биоразнообразия растений от плодородия почв, их фитотоксичности, концентрации тяжелых металлов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследований служили почвы и растения наземных экосистем, подверженных воздействию предприятий Кольской ГМК в Мурманской области. Полевые исследования проводили в конце июня – начале июля 2022 г. на пробных площадках (полигонах) двух почвенно-геоботанических профилей. Профиль 1 “Североникель” включал экосистемы (площадки КМ-1–КМ-5), расположенные на удалении от 0,7 до 40,0 км на юг от территории предприятий ГМК в г. Мончегорске. Профиль 2 “Печенганикель” – экосистемы (площадки КНЗ-3–КНЗ-11), удаленные от 0,3 до 30,0 км на юго-запад от пгт. Никель (табл. 1).

Местоположение площадок выбиралось с учетом розы ветров, основного направления миграции газопылевых выбросов от предприятий ГМК, удаления от них, морфологических признаков антропогенного воздействия на почвенный и растительный покров, выделенных ранее другими исследователями зон воздействия на экосистемы [Евдокимова и др., 2011, 2014].

Профиль 1 – “Североникель”

Площадка КМ-1 – импактная зона сильного техногенного воздействия, расположенная в 2,5 км южнее территории ГМК в г. Мончегорске на средней части северо-западного склона 18–25° горы Сопчуайвеич. Микрорельеф мелкобугристый. Растительный покров – елово-березовое криволесье с кустарничками – сильно нарушен в результате химического и механического воздействия.

Растительные сообщества имеют малое видовое разнообразие – 9–12 видов высших сосудистых растений на 100 м². Древостой образован *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*,

сомкнутость крон 0,3–0,4. В кустарниковом ярусе с высоким постоянством встречаются *Betula nana*, *Ledum palustre*, *Salix glauca*, *Vaccinium uliginosum*. В зависимости от степени нарушенности сообществ проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса варьирует от 5 до 70 %. Из кустарничков с высоким постоянством, а часто и обилием встречаются *Empetrum nigrum*, *Vaccinium myrtilus*, *V. vitis-idaea*, из травянистых видов – *Anthoxanthum alpinum*, *Chamaenerion angustifolium*, *Chamaepericlymenum suecicum*, *Lycopodium annotinum*, *Geranium sylvaticum*, *Pinguicula alpina*, *Solidago virgaurea*, *Trollius europaeus*. Лишайниковый ярус не выражен, встречаются *Cetraria islandica*, *Cladonia uncialis*, *Flavocetraria nivalis*. Из мхов преобладают *Pleurozium schreberi* и *Polytrichum juniperinum*.

Наличие в растительных сообществах подроста березы указывает на потенциальную возможность восстановительных процессов.

Почва – сухоторфянисто-подзол, альфегумусовый, поверхностно-осветленный, песчаный, сильно скелетный (Ombric Skeletic Dystric Hemic Histosols (Toxic)), формула профиля – О-ТJ-Е-ВНФ. Общая характеристика почв этой и других площадок приведена в табл. 2.

Площадка КМ-2 – буферная зона среднего воздействия в 9,9 км южнее КМК на холмистой морене южного предгорья горного массива Мончетундра.

Растительный покров – сосновые и сосново-березовые леса на дренированных местообитаниях, нарушенных хозяйственной деятельностью человека – рубкой и пожаром, находящиеся в стадии постпирогенного восстановления. Видовое разнообразие – 20–25 видов на 100 м². Древостой образован *Pinus sylvestris* var. *lapponica*, сомкнутость крон 0,4–0,6, единично встречается *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*. Данный лесной массив представляет собой сочетание мертвопокровных и кустарничковых сосновых лесов. Из кустарничков с высоким постоянством встречаются *Juniperus communis*, *Ledum palustre*, *Salix glauca*, *S. phylicifolia*, *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata*, *Vaccinium uliginosum*. Травяно-кустарничковый ярус с высоким постоянством и обилием образуют *Empetrum nigrum*, *Vaccinium myrtilus*, *V. vitis-idaea*, из травянистых видов часто содоминирует *Chamaepericlymenum suecicum*.

Т а б л и ц а 1
Общая характеристика пробных площадок

Площадка	Координаты, с. ш., в. д.	Расстояние, направ- ление	Зона воздействия	Фитоценоз	Разнообразие, видов/100 м ²	Тип почвы
Профиль 1 – “Североникель” в г. Мончегорске						
КМ-1	67,884078, 32,791917	2,5 км, юг	Импактная сильного воздействия	Елово-березовое криволесье	9–12	Сухоторфянисто- подзол альфе- гумусовый
КМ-2	67,817182, 32,76600	9,9 км, юг	Буферная среднего воздействия	Сосново- березовый лес	20–25	Подзол альфе- гумусовый
КМ-3	67,747712, 32,820617	17,3 км, юг	Буферная слабо- го воздействия	Березово- еловый лес	18–25	»
КМ-4	67,652618 32,877770	28,1 км, юг	Буферная возможного воздействия	Березово- сосновый лес	31–43	»
КМ-5	67,566795 32,477947	40,2 км, юг	Фоновая территория	Березово- сосновый лес	35–44	Сухотор- фянисто-подзол иллювиально- железистый
Профиль 2 – “Печенганикель” в пгт. Никель						
КНЗ-8	69,425430 30,213055	0,3 км, юго-запад	Импактная сильного воздействия	Кустарниково- кустарничково- моховое болото	10–15	Торфяная эутрофная
КНЗ-8А	69,391687, 30,190503	2,7 км, юго-запад	Буферная значительного воздействия	Березово- сосновые заросли (постпирогенная сукцессии)	10–15	Сухоторфянистая стратифи- цированная
КНЗ-9	69,361105, 30,073485	6,0 км, юго-запад	Буферная среднего воздействия	Березово- сосновый лес	20–30	Светлозем иллювиально- железистый
КНЗ-10	69,251409, 30,091908	17,0 км, юго-запад	Буферная слабого воздействия	Сосново- березовый лес	13–26	Подзол иллювиально- железистый
КНЗ-11	69,152225 30,146305	30,0 км, юг	Фоновая территория	Березовое криволесье	23–36	»

Почва – подзол альфегумусовый, грунтово-глееватый, поверхностно-осветленный, песчаный, сильно скелетный (Skeletal Gleyic Podzols (Toxic)), формула профиля – О-Е-ВНФ-С.

Площадка КМ-3 – буферная зона слабого воздействия в 17,3 км южнее ГМК на моренной террасе в нижней части горного склона северо-восточной экспозиции.

Растительный покров – березово-еловый лес с кустарничками без видимых изменений от воздействия ГМК. Видовое разнообразие – 18–25 видов на 100 м². Древесный ярус сомкнуто-стью 0,5–0,7 образован *Picea obovata* и *Betula*

pubescens ssp. *czerepanovii*. Подлесок, от густого до разреженного, представлен *Salix caprea*, *S. phylicifolia*, *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata*. Кустарниковый ярус занимает от 5 до 20 % площади ценоза, с высоким постоянством и обилием встречаются *Juniperus communis*, *Ledum palustre*, *Vaccinium uliginosum*. В травяно-кустарничковом ярусе с высоким постоянством встречаются *Anthoxanthum alpinum*, *Athyrium distentifolium*, *Chamaenerion angustifolium*, *Chamaepericlymenum suecicum*, *Dryopteris filix-mas*, *Empetrum nigrum*, *Geranium sylvaticum*, *Gymnocarpium dryopteris*, *Linnaea borealis*,

Т а б л и ц а 2

Общая характеристика свойств почв пробных площадок

Площадка	Гори- зонт	Слой, см	Плотность, г/см³	Органическое	Частицы	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	Al³⁺	P₂O₅	K₂O
				вещество	<0,01 мм					
				%	рН, ед.					
Профиль 1 – “Североникель” в г. Мончегорске										
КМ-1	О	0–5	0,13	87,5	–	4,5	3,5	0	118	298
	TJ	5–30	0,18	89,7	–	4,7	3,9	0	118	233
	BHF	30–38	–	2,8	–	–	5,5	<2	–	–
	BHF	40–50	–	2,9	–	–	5,5	<2	–	–
	С	50–60	–	1,9	–	–	5,4	<2	–	–
КМ-2	О	0–6	0,23	85,2	–	5,0	3,6	0	91	475
	BHF	8–35	1,26	6,3	8,0	–	4,5	25	23	32
	CD	40–50	–	2,3	–	–	4,5	19	–	–
КМ-3	О	0–5	0,09	93,4	–	4,2	2,8	0	137	450
	Е	5–10	1,09	2,4	9,3	4,3	3,1	73	8	40
	BHF	10–20	1,17	4,4	11,1	4,9	4,2	105	96	26
КМ-4	О	0–3	0,05	80,9	–	4,4	3,2	0	337	850
	Е	3–13	0,78	3,7	9,2	4,5	3,1	66	12	35
	BHF	13–24	1,05	2,6	9,5	5,2	4,7	10	35	38
	BC	30–40	–	2,3	–	–	5,3	78	–	–
	CD	60–70	–	1,1	–	–	5,0	<2	–	–
КМ-5	О	0–5	0,05	96,3	–	3,8	2,6	0	84	600
	Т	5–20	0,17	50,0	–	3,9	2,6	0	65	285
	Е	20–30	1,19	1,4	5,5	–	3,3	72	36	32
	BHF	40–50	–	2,1	–	–	4,6	16	–	–
	BFC	75–80	–	1,2	–	–	5,0	3	–	–
Профиль 2 – “Печенганикель” в пгт. Никель										
КНЗ-8	О	0–5	0,19	68,5	–	5,7	5,2	0	65	420
	ТЕ	5–20	0,21	85,7	–	5,8	5,3	0	19	195
КНЗ-8А	О	0–10	0,07	56,4	–	5,7	4,9	0	121	365
	TJ	10–20	0,32	66,9	–	5,7	4,8	0	68	355
	BHF	30–50	–	1,3	–	–	5,2	<2	–	–
	С	60–70	–	1,1	–	–	5,2	<2	–	–
КНЗ-9	О	0–7	0,08	59,5	–	4,5	3,4	0	466	490
	Е	7–9	0,96	5,4	45,9	5,1	3,5	332	50	78
	BHF	9–25	1,17	2,9	40,0	5,3	4,0	211	50	71
	CRM	30–40	–	–	–	–	4,2	8	–	–
	CRM	50–60	–	–	–	–	4,3	4	–	–
КНЗ-10	О	0–3	0,16	44,7	–	4,7	3,3	0	436	325
	Е	3–7	1,15	3,8	10,2	4,8	3,2	98	16	35
	BHF	7–25	1,08	5,5	9,3	5,2	4,6	12	107	23
	С	45–55	–	–	–	–	4,9	4	–	–
КНЗ-11	О	0–4	0,13	77,4	–	4,3	3,0	0	224	850
	Е	4–7	0,99	6,9	13,0	4,6	3,1	146	32	64
	BF	7–25	1,03	4,5	14,8	5,0	4,2	168	70	33
	С	50–60	–	–	–	–	4,5	13	–	–

П р и м е ч а н и е. Прочерк – показатель не определялся.

Lycopodium annotinum, *Phegopteris connectilis*, *Solidago virgaurea*, *Trientalis europaea*, *Vaccinium myrtillus* и *V. vitis-idaea*. Мохово-лишайниковый ярус с проективным покрытием 5–15 % образуют *Barbilophozia lycopodioides*, *Hylocomi-*

um splendens, *Pleurozium schreberi*, *Sanionia uncinata*, *Cetraria islandica*, *Cladonia rangiferina*, *C. stellaris*, *C. arbuscula*, *C. gracilis* и др.

Почва – подзол альфегумусовый, поверхностно-осветленный, песчаный, сильно ске-

летный (Skeletal Podzols), формула профиля – О-Е-BHF-C.

Площадка КМ-4 – буферная зона очень слабого воздействия в 28,1 км южнее ГМК на всхолмленной возвышенности, в нижней части склона 3–5° юго-восточной экспозиции.

Растительный покров – березово-сосновый лес с кустарничками без видимых признаков воздействия ГМК. Видовое разнообразие – 31–43 вида на 100 м². Древостой образован *Pinus sylvestris* var. *lapponica* и *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, сомкнутость крон 0,5–0,7. Кустарниковый ярус не выражен, встречаются *Juniperus communis*, *Ledum palustre*, *Salix glauca*, *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* и *Vaccinium uliginosum*. Травяно-кустарничковый ярус занимает от 20 до 45 %. Из кустарничков встречаются *Arctous alpina*, *Empetrum nigrum*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, из травянистых видов – *Cornus suecica*, *Chamaenerion angustifolium*, *Diphysastrum complanatum*, *Linnaea borealis*, *Lycopodium annotinum*, *Solidago virgaurea*. Мохово-лишайниковый ярус занимает от 5 до 15 %. Из представителей лишенофлоры встречаются *Cladonia coccifera*, *C. pleurot*, *C. gracilis*, *Flavocetraria nivalis*, из бриофлоры – *Racomitrium canescens* и *R. lanuginosum*.

Почва – подзол альфегумусовый, поверхностно-осветленный, песчаный, сильно скелетный (Skeletal Podzols), формула профиля – О-Е-BHF-C.

Площадка КМ-5 – фоновая территория, внешне не подверженная воздействию ГМК в г. Мончегорске, в 40,2 км южнее ГМК на всхолмленной возвышенности с моренными грядами (озами), в нижней части склона 10–15° восточной экспозиции.

Растительный покров – естественный березово-сосновый лес с мохово-кустарничковым покровом. Видовое разнообразие – 35–44 вида на 100 м². Древостой образован *Pinus sylvestris* var. *lapponica*, *Betula pendula*, *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, сомкнутость крон 0,5–0,7. По структуре и видовому составу данные сообщества близки с описанными выше березово-сосновыми лесами, широко распространенными на площадке КМ-4.

Почва – сухоторфянисто-подзол иллювиально-железистый, поверхностно-осветленный, песчаный, сильно скелетный на песчано-каменистой морене (Histic Skeletic Podzol), формула профиля – О-Т-Е-BHF-C.

Профиль 2 – “Печенганикель”.

Площадка КНЗ-8 – импактная зона сильного воздействия ГМК в пгт. Никель, в пределах санитарно-защитной зоны, на низинном осушенном болоте заболоченной озерной террасы оз. Куэтсьярви.

Растительный покров представлен кустарниково-кустарничково-моховым болотом. Видны результаты сильного химического воздействия на растения (ожоги коры, изменения структуры поверхности листьев). Видовое разнообразие – 10–15 видов на 100 м². Кустарниковый ярус занимает от 15 до 65 % площади ценоза, доминируют *Betula nana*, *Ledum palustre*, *Salix lapponum*. В травяно-кустарничковом ярусе преобладают *Empetrum hermaphroditum*, *Rubus chamaemorus*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, их проективное покрытие варьирует от 15 до 45 %. Травянистые виды встречаются единично, это *Carex rostrata*, *Deschampsia cespitosa*, *Eriophorum angustifolium*, *E. vaginatum*, *Trichophorum cespitosum*. На мохово-лишайниковый ярус приходится от 15 до 40 % от общего проективного покрытия. Из лишайников с высоким постоянством встречаются *Cladonia stellaris*, *C. arbuscula*, *C. coccifera*, *C. gracilis*, *Flavocetraria nivalis*. Моховая сингузия образована *Dicranum elongatum*, *D. majus*, *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Racomitrium canescens*, *R. lanuginosum*, *Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum fuscum*, *S. girgensohnii*.

Почва – торфяная, эутрофная, осушенная (Drainic Fibric Histosol (Dystric, Toxic)), формула профиля – О-ТЕ.

Площадка КНЗ-8А – буферная зона значительного воздействия в 2,7 км юго-западнее ГМК на нижней части склона 5–7° северо-западной экспозиции горы Хангаславденваара.

Растительный покров – березово-сосновые заросли (постпирогенная сукцессия). Видовое разнообразие – 10–15 видов на 100 м². Древостой условно одновозрастный, образован порослью *Pinus sylvestris* var. *lapponica* и *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, сомкнутость крон 0,4–0,5. Кустарниковый ярус не выражен, единично встречаются *Betula nana*, *Ledum palustre*, *Salix lapponum*, *Salix glauca*. В разреженном (3–15 %) травяно-кустарничковом ярусе с высоким постоянством присутствуют *Empetrum nigrum*, *Vaccinium myrtillus*,

V. vitis-idaea, *Chamaepericlymenum suecicum*, *Chamaenerion angustifolium*, *Lycopodium annotinum*, *Solidago virgaurea*.

Почва – сухоторфянистая, стратифицированная (Ombric Skeletic Dystric Hemic Histosols (Toxic)), формула профиля – О-ТJ-BC–С.

Площадка КНЗ-9 – буферная зона среднего воздействия в 6 км юго-западнее ГМК на слабонаклонной расчлененной низменной равнине в приречной части склона 7–10°.

Растительный покров – березово-сосновый лес с кустарничками. Видовое разнообразие – 20–30 видов на 100 м². Древостой разновозрастный, представлен *Pinus sylvestris* var. *lapponica* и *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, единично отмечены формы березы, близкие к *B. pendula*, сомкнутость крон 0,5–0,7. Выражен подрост сосны и березы. Кустарниковый ярус занимает от 5 до 25 % описываемой площади ценозов. Из высоких кустарников (от 3 до 5,5 м) встречаются *Salix caprea* и *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata*, из низких (0,5–1,5 м) – *Betula nana*, *Juniperus communis*, *Ledum palustre*, *Salix glauca*, *Vaccinium uliginosum*. В травяно-кустарничковом ярусе преобладают *Chamaenerion angustifolium*, *Chamaepericlymenum suecicum*, *Deschampsia cespitosa*, *Diphasiastrum complanatum*, *Equisetum pratense*, *E. sylvaticum*, *Geranium sylvaticum*, *Gymnocarpium dryopteris*, *Linnaea borealis*, *Lycopodium annotinum*, *Trientalis europaea*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*. Лишайниково-моховой покров занимает от 8 до 30 %, в моховой синузии преобладают *Racomitrium canescens* и *Racomitrium lanuginosum*, в лишайниковой – *Cladonia arbuscula*, *C. coccifera*, *C. gracilis*, *C. pleurot*, *C. rangiferina*, *C. stellaris*.

Почва – светлосел иллювиально-железистый, супесчаный (Folic Albic Podzol (Toxic)), формула профиля – О-Е-BHF-CRM.

Площадка КНЗ-10 – буферная зона слабого воздействия в 17 км на юг, юго-запад от ГМК на всхолмленной возвышенности, верхняя часть склона 1–2° северной экспозиции.

Растительный покров – сосново-березовый лес с лишайниково-кустарничковым напочвенным покровом без внешних нарушений. Видовое разнообразие – 13–26 видов на 100 м². По видовому составу и структуре древостоя эти сообщества близки к описанным выше ценозам (площадка КНЗ-9). Отличаются большей долей в составе травянистого

яруса злаков, в частности *Anthoxanthum alpinum*, *Festuca ovina*, *Melica nutans*, *Poa pratensis*. Мохово-лишайниковый ярус занимает от 5 до 25 %. Из лишайников отмечены: *Cetraria islandica*, *Cladonia rangiferina*, *C. stellaris*, *C. uncialis*, *C. deformis*, *C. coccifera*, *C. pleurot*, *C. gracilis*. Среди представителей брйофлоры встречаются *Barbilophozia lycopodioides*, *Dicranum majus*, *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Racomitrium lanuginosum*.

Почва – подзол иллювиально-железистый, поверхностно-осветленный, песчаный, сильно скелетный (Folic Skeletic Albic Podzol), формула профиля – О-Е-BHF-С.

Площадка КНЗ-11 – фоновая территория в 30 км на юг от пгт. Никель на моренном холме, в верхней части склона 1–2° северо-западной экспозиции.

Растительный покров – естественное березовое криволесье с кустарничковым напочвенным покровом. Видовое разнообразие – 23–36 видов на 100 м². Березовые криволесья являются неотъемлемой частью лесотундровой зоны Кольского полуострова. Древостой образован *B. pubescens* ssp. *czerepanovii*, сомкнутость крон 0,3–0,4. Кустарниковый ярус занимает от 3 до 35 % площади ценоза, он представлен *Betula nana*, *Ledum palustre*, *Salix glauca*, *Salix lapponum* и *Juniperus communis*. Травяно-кустарничковый ярус образуют *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *Empetrum nigrum*, из травянистых видов с высоким постоянством встречаются *Geranium sylvaticum*, *Chamaenerion angustifolium*, *Trollius europaeus*, *Pinguicula alpina*, *Omalotheca supina*, *Athyrium distentifolium*, *Chamaepericlymenum suecicum* и др. Лишайниково-моховой покров хорошо выражен, его проективное покрытие составляет от 2 до 45 %. Лишайниковая синузия образована *Cetraria islandica*, *Cladonia arbuscula*, *C. coccifera*, *C. deformis*, *C. gracilis*, *C. pleurota*, *C. rangiferina*, *C. stellaris*, *C. uncialis*, *Flavocetraria nivalis*. В моховом покрове доминируют *Pleurozium schreberi* и *Polytrichum juniperinum*.

Почва – подзол иллювиально-железистый, поверхностно-осветленный, песчаный (Folic Skeletic Albic Podzol), формула профиля – О-Е-BHF-С.

На пробных площадках диагностику и наименование типов и горизонтов почв проводили по Классификации и диагностике почв России

[2004], а также по международной классификации – WRB FAO [2015].

Геоботанические описания выполнены согласно общепринятым методикам [Полевая геоботаника, 1964], для всех типов сообществ размер пробной площади составлял 100 м². Латинские названия видов растений приведены в соответствии с International Plant Names Index (IPNI) (<https://www.ipni.org/>).

Почвенные пробы брались из генетических горизонтов преобладающих на пробной площадке типов почв, преимущественно подзолов. Для составления объединенных проб единичные образцы брали сверху вниз почвенной толщи в 5–10 точках, а в разрезах пробы – снизу вверх профиля из горизонтов, где методом кольца определяли плотность их сложения (P).

Подготовка почвенных проб к анализам включала их высушивание при комнатной температуре. Почвенные пробы для общих анализов размельчались фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке и просеивались: минеральные почвенные пробы на ситах с ячейками 1 мм, а торфянистые – 2 мм. Для определения ЭХС почв пробы их минеральных горизонтов и зола органогенных горизонтов дополнительно растирались до состояния пудры в агатовой ступке.

Содержание частиц физической глины – менее 0,01 мм (<10 мкм) – в минеральных горизонтах (E, BHF, BF, CRM, BC, C, CD) почв определяли в водной суспензии пипеточным методом. Органическое вещество (ОВ) в минеральных горизонтах выделяли окислением смесью 0,4 н K₂Cr₂O₇ в H₂SO₄ при нагревании до 125 °С. Пробы органогенных (O, T, TJ) горизонтов почв, а также листьев растений озоляли при температуре 550 °С. В суспензиях измеряли: потенциометрически – актуальную (pH_{H₂O}) и потенциальную кислотность (pH_{KCl}) почв, фотоколориметрически – концентрацию подвижного (обменного) алюминия в вытяжке 1 М KCl. В водной вытяжке определяли кондуктометрически удельную электрическую проводимость (УЭП), гравиметрически – плотный остаток солей, микрокапиллярным электрофорезом – концентрацию сульфат-ионов. Обеспеченность почв подвижными фосфором и калием оценивали по их количеству в вытяжке 0,2N HCl по методу Кирсанова.

Формы Ni, Cu, Co, Cr, Pb, Zn, Mn, подвижные в 1 М ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH 4,8 (ААБ pH 4,8), а также обменные Ca и Mg измеряли в растворах методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии.

Общее (валовое) содержание химических элементов – Ni, Cu, Co, Cr, Pb, Zn, Mn, а также Ca, Mg, K, Na, P, Si, Al, Fe в пробах почв, золе их органогенных горизонтов определяли методом оптической атомно-эмиссионной спектрометрии с использованием дугового аргонного двухструйного плазмотрона, спектрометра (PGS-2) и многоканального анализатора эмиссионных спектров (МАЭС). Калибровка и контроль точности измерений в пробах химических элементов выполнялись по аттестованным значениям их массовой доли в стандартных образцах почв и растений. Относительная погрешность измерений в пределах 10 %.

В пробах гравиметрически измерялась гигроскопическая влага, количество веществ и химических элементов рассчитано на абсолютно-сухое вещество (а. с. в.).

Статистическую обработку данных проводили с помощью пакета программ Microsoft Excel и STATISTIKA 10.0, корреляционный анализ – с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования показали изменения в экосистемах почвенно-геоботанических профилей состояния фитоценозов и почв с удалением от воздействующих на них предприятий Кольской ГМК. Уменьшение техногенной нагрузки и антропогенного, прежде всего пирогенного, воздействия на экосистемы нашло отражение в увеличении в сообществах видового разнообразия (см. табл. 1).

В почвенно-геоботанических профилях выявлено пространственное изменение не только ценологических комплексов, но и типов, подтипов и разновидностей почв, их физических и физико-химических свойств, гранулометрического и элементного химического состава (см. табл. 1 и 2).

Изученные подзолы, светлосемы и торфяные почвы имеют характерные для них генетические горизонты (см. табл. 2), варьирующие

по глубине залегания и мощности, плотности, содержанию органического вещества и частиц <0,01 мм.

Наименьшая плотность (0,05–0,19 г/см³) присуща поверхностным органогенным подстилочным торфяным горизонтам О мощностью 2–10 см и более. В нижележащих минеральных почвенных горизонтах плотность на порядок больше (0,78–1,26 г/см³). Почвы на моренных отложениях преимущественно песчаные и супесчаные (частиц <0,01 мм до 10,0 % и 10,1–20,0 % соответственно), встречаются и тяжелосуглинистые их разновидности (частиц <0,01 мм 40,1–50,0 %).

Большинству почв присуща очень сильнокислая ($pH_{KCl} < 4,0$) и сильнокислая (pH_{KCl} 4,1–4,5) реакция среды, становящаяся менее кислой вниз по профилю почв, в минеральных горизонтах (см. табл. 2). Наиболее кислыми были органогенные горизонты почв на дальних фоновых площадках (КМ-5 и КНЗ-11).

Высокая концентрация обменного алюминия (Al^{3+}) – более 30 мг/кг – выявлена только в минеральных почвенных горизонтах (Е, ВНФ) с сильнокислой реакцией среды. Обменного алюминия меньше в песчаных, а больше – в тяжелосуглинистых разновидностях почв. В горизонтах органогенных и минеральных с $pH_{KCl} > 5,0$ количество обменного алюминия меньше пределов метода его определения.

В России отсутствуют нормативы оценки в естественных экосистемах значений свойств и состава почв, определяющих плодородие и другие показатели их качества для жизни и биоразнообразия диких растений фитоценозов. В этих целях были использованы действующие в России агрохимические и гигиенические нормативы для оценки качества минеральных и торфяных почв агроэкосистем.

По агрохимическим нормативам содержание подвижных фосфора и калия в органогенных (О, Т₁, Т, Т_Е), и особенно в минеральных горизонтах почв, очень низкое и низкое для требовательных к условиям минерального питания культурных растений. Возможно, установленное количество подвижных фосфора и калия в корнеобитаемом слое почв изученных экосистем “нормально” для питания олиго- и мезотрофных диких растений фитоценозов на них.

Валовое содержание и концентрация подвижной (в ААБ pH 4,8) формы Ni, Cu, Co, Cr

различны в органогенных и минеральных почвенных горизонтах. Их количества существенно уменьшаются по мере удаления от техногенных источников их выбросов в г. Мончегорске и пгт. Никель (табл. 3).

Уровень концентрации ТМ в поверхностных органогенных горизонтах почв выше, чем в минеральных, особенно в супесчаных и песчаных. Вглубь минеральной толщи почв наблюдается увеличение валового содержания Co и Cr, а также Ni и Cu (площадки КМ-1, КМ-3 и КМ-5, КНЗ-8А, КНЗ-9, КНЗ-10, КНЗ-11).

ОБСУЖДЕНИЕ

Поверхностные органогенные горизонты О изученных почв различаются по мощности, ботаническому составу слагающего его растительного материала и степени разложения. Этим объясняется широкое варьирование их плотности сложения. Сложенные мхами и/или лишайниками малозольные горизонты О почв, как и снежный покров, служат хорошими объектами для изучения пространственного загрязнения почвенного покрова экосистем и окружающей среды в целом. Их ЭХС позволяет диагностировать и оценивать даже незначительные количества аккумулируемых техногенных выбросов на локальном и региональном уровнях.

Однако при оценке экологического состояния наземных экосистем по загрязнению почвенного покрова ТМ и их подвижности, обеспеченности растений фосфором, калием и другими элементами минерального питания важно учитывать специфику поверхностных органогенных горизонтов. Она заключается в их органогенном генезисе, малой плотности сложения, сильнокислой реакции среды. Последняя обусловлена органическими кислотами и недостатком нейтрализующих их оснований. В естественных условиях формирование ЭХС органогенного горизонта почв происходит за счет биогенного накопления химических элементов в мертвом и живом веществе растительных и животных организмов, миграции веществ в системе “почва – растение”, а также аккумуляции на поверхности почв и растений выпадающих на них из атмосферы твердых и жидких аэрозолей природного и антропогенного происхождения. К последним относятся техногенные выбро-

Т а б л и ц а 3

Профильное и пространственное изменение валового содержания и концентрации подвижной формы ТМ в почвах, мг/кг

Площадка	Слой, см	Валовое содержание				Подвижные в ААБ с рН 4,8			
		Ni	Cu	Co	Cr	Ni	Cu	Co	Cr
Профиль 1 – “Североникель”									
КМ-1	0–5	662	1210	118	57	120,9	601,2	41,6	5,4
	5–30	609	867	69	142	188,0	49,6	23,5	3,8
	30–38	388	41	23	1257	5,4	0,5	0,1	1,4
	40–50	408	33	24	2029	12,3	0,9	0,1	3,3
	50–60	464	34	28	2051	11,4	1,8	0,3	2,9
КМ-2	0–6	552	1077	95	48	130,0	275,0	4,2	3,1
	8–35	208	144	40	292	6,8	5,4	<0,1	1,9
	40–50	136	84	30	337	3,0	2,4	<0,1	1,2
КМ-3	0–5	269	564	32	259	74,0	58,0	5,7	1,7
	5–10	77	48	24	185	4,0	2,4	0,1	1,1
	10–20	103	71	28	194	3,8	1,1	0,1	1,0
КМ-4	0–3	631	526	38	26	31,3	24,5	1,7	1,9
	3–13	38	73	6	83	1,7	3,2	<0,1	1,6
	13–24	42	64	14	138	2,8	1,1	0,2	1,6
	30–40	42	53	11	118	0,4	0,3	<0,1	1,2
	60–70	27	42	10	74	<0,1	0,5	<0,1	1,0
КМ-5	0–5	91	182	15	6	14,0	6,1	0,7	1,0
	5–20	181	347	13	47	5,3	1,3	<0,1	<0,1
	20–30	24	30	6	62	4,0	0,1	<0,1	<0,1
	40–50	31	17	13	99	0,3	0,4	<0,1	1,1
	75–80	49	24	12	135	0,1	0,4	<0,1	1,2
Профиль 2 – “Печенганикель”									
КНЗ-8	0–5	1200	3276	138	138	652,5	554,5	7,8	13,6
	5–20	262	287	34	55	94,0	16,3	6,8	2,3
КНЗ-8А	0–10	1749	3139	140	183	476,0	331,5	8,9	9,7
	10–20	602	913	31	53	76,0	31,2	1,2	1,7
	30–50	43	84	22	89	2,3	1,3	<0,1	1,6
	60–70	55	128	18	91	0,5	1,5	<0,1	1,0
КНЗ-9	0–7	470	550	53	68	113,5	106,5	7,8	1,9
	7–9	63	54	20	80	13,8	4,0	0,8	1,3
	9–25	52	51	29	90	7,0	1,7	0,4	1,0
	30–40	41	70	28	122	0,9	0,1	<0,1	1,0
	50–60	72	104	31	130	1,0	1,3	<0,1	1,4
КНЗ-10	0–3	369	384	23	104	56,0	43,3	2,3	8,2
	3–7	23	44	6	64	4,6	1,4	0,1	1,1
	7–25	25	34	12	72	2,4	0,5	0,1	1,0
	45–55	26	25	13	85	0,2	0,3	<0,1	1,0
КНЗ-11	0–4	203	145	12	39	25,7	6,1	2,0	5,1
	4–7	23	26	7	66	2,4	0,7	0,1	3,0
	7–25	29	70	15	88	1,9	0,5	0,1	1,1
	50–60	32	19	20	77	0,1	0,4	<0,1	1,0

сы. Игнорирование описанной специфики горизонта О ведет к неверной оценке его плодородия и загрязнения.

Исследования показали, что техногенные выбросы предприятий Кольской ГМК

вблизи них (площадки КМ-1, КМ-2 и КНЗ-8, КНЗ-8А) сделали менее кислой реакцию среды горизонта О по сравнению с почвами фоновых территорий (площадки КМ-5 и КНЗ-11) (см. табл. 2). Ранее это отмечали и другие

исследователи [Евдокимова и др., 2014; Лянгузова и др., 2016].

Вероятно, это обусловлено поступлением в почвы с техногенными веществами оснований – ионов Са и Mg, снижающих концентрацию в почвенной среде фитотоксичных для культурных растений ионов алюминия (Al^{3+}). Его концентрация уменьшается вниз почвенных профилей со снижением кислотности почв (см. табл. 2), а при pH_{KCl} более 5,0 концентрация обменного Al^{3+} в почвах становится ниже пределов его обнаружения.

Опасность для биоразнообразия растений естественных таежных и тундровых лесных и болотных экосистем очень сильно кислой реакции среды и ионов Al^{3+} не ясна. Это объясняется тем, что на сильноокислых почвах с высокой концентрацией обменного Al^{3+} в зонах слабого техногенного воздействия и на фоновых площадках у растений не выявлено морфологических признаков их угнетения.

Плодородие всех поверхностных корнеобитаемых слоев минеральных и торфяных почв изученных экосистем по агрохимическим нормативам весовых концентраций подвижных P_2O_5 и K_2O низкое и очень низкое (см. табл. 2). Оно соответствует олиго- и мезотрофным условиям минерального питания растений. В горизонте О весовая концентрация фосфора и калия средняя и повышенная, вероятно, из-за биогенной их аккумуляции живой растительностью. Только этим можно объяснить повышенное содержание в нем калия, легко вымывающегося из растений и органо-генных горизонтов почв. Техногенные выбросы предприятий Кольской ГМК не оказали заметного влияния на весовую концентрацию подвижных P_2O_5 и K_2O в горизонте О (см. табл. 2).

Для более объективной оценки влияния антропогенного воздействия на обеспеченность растений изученных экосистем элементами минерального питания на почвах с разной плотностью сложения и весовой концентрацией элементов были рассчитаны объемные концентрации фосфора и калия в слое 0–5 см и их запасы в слое 0–15 см почвы. В профилях 1 и 2 была получена неодинаковая картина их изменения при удалении от источников выбросов. В профиле 1 концентрации и запасы элементов уменьшались, а в профиле 2 – увеличивались. Причины таких разли-

чий пространственного изменения объемных концентраций и запасов P_2O_5 и K_2O в почвах не понятны и требуют изучения.

Многолетние выбросы предприятий Кольской ГМК в г. Мончегорске и пгт. Никель преимущественно аккумулированы в поверхностных горизонтах почв, где существенно увеличили валовое содержание и концентрацию подвижных Ni, Cu, Co, Cr. Максимально их количество в органо-генных горизонтах почв импактных зон, а далее оно уменьшается по мере удаления от источников выбросов (см. табл. 3).

Выявлено широкое пространственное варьирование содержания Ni, Cu, Co, Cr в точечных пробах из поверхностного слоя почв в пределах пробных площадок, а также постепенное уменьшение количества и варьирования этих тяжелых металлов по мере удаления от источника техногенных выбросов (рис. 1).

Исследования показали (см. рис. 1), что в лесных подстилках профиля 2 по мере удаления от пгт. Никель в точечных пробах уменьшаются размах варьирования валового содержания ТМ и величина его медианного значения. Такая же закономерность отмечена и другими исследователями [Евдокимова и др. 2011, 2014; Лянгузова и др., 2016; Кашулина, 2017]. Широкое варьирование содержания ТМ в органо-генных горизонтах почв названо причиной, снижающей корреляцию между ним и расстоянием от источников выбросов [Баркан, Лянгузова, 2018a].

Органо-генные и минеральные горизонты почв существенно различаются не только по свойствам и ЭХС, валовому содержанию и концентрацией подвижной формы химических элементов, но и по их подвижности – доле (в %) подвижной формы в общем содержании. Она в органо-генных горизонтах широко варьирует и существенно выше (Ni 5–54, Cu 5–50, Co 4–35, Cr 1–13 %), чем в минеральных (Ni <1–5, Cu <1–5, Co <1–2, Cr <1–3 %). При этом в поверхностном органо-генном горизонте почв проявилась тенденция уменьшения подвижности ТМ в почвах по мере удаления от г. Мончегорска и пгт. Никель к фоновым территориям. В минеральных горизонтах такого не наблюдалось.

Особенности свойств и состава органо-генных и минеральных горизонтов почв обусловлены различием генезиса составляющих их

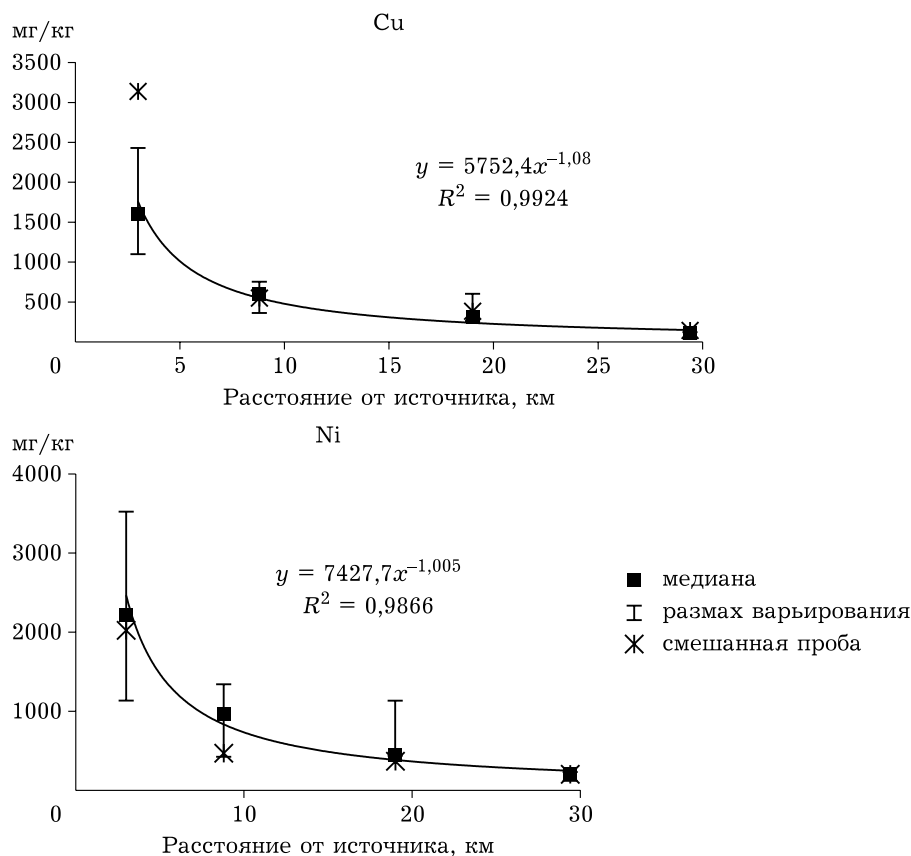


Рис. 1. Изменение параметров валового содержания ТМ в лесных подстилках Профиля 2 в зависимости от расстояния до источника выбросов

веществ. В первых они преимущественно биогенного генезиса, а у вторых литогенного. Минеральные горизонты почв в основном наследуют минеральный и элементный химический состав от почвообразующих и даже от подстилающих горных пород. В них могут отражаться геохимическая (металлогеническая) специфика изучаемых территорий, наличие на них рудных месторождений и рудопроявлений. К таким территориям относится Кольский полуостров с его медно-никелевыми и иными месторождениями, которые могли оказать влияние на формирование ЭХС почв.

Его результатом, возможно, является аномально высокое и возрастающее вниз по профилю почв валовое содержание Ni и Cr на площадке КМ-1, а также увеличение валового содержания Ni, Cu, Co, Cr вниз по профилю почв на площадках КМ-3, КМ-5, КНЗ-8А, КНЗ-9 (см. табл. 3). Такое изменение содержания ТМ в профиле почв может быть следствием как их нисходящей миграции и осаднения

на геохимических барьерах, так и влияния других факторов.

Зависимость содержания ТМ в почвах от минерального состава почвообразующих пород доказывают результаты их определения в генетических горизонтах почв в районе пгт. Никель, сформировавшихся на разных по минеральному составу породах. Максимальное количество Cu, Zn, Mn, Ni, Co было в почвах на элювии хлоритовых сланцев [Ежов, 2010].

Полученные данные о высоком содержании Ni, Cu, Co, Cr в почвообразующих породах в районе г. Мончегорска и пгт. Никель указывают на возможную связь их минерального и элементного химического состава с породами и минералами медно-никелевых месторождений. Они могли обусловить формирование здесь природных геохимических аномалий с высоким содержанием в почвах.

Опубликованные сведения о геологии, минералогии и геохимии медно-никелевых и иных рудных месторождений на Кольском

полуострове и данные о содержании Ni, Cu, Co, Cr в минеральной толще почв региона дают основание предположить наличие на его территории природных геохимических аномалий с высоким содержанием этих и других химических элементов в почвах, на участках, где месторождения выходят на поверхность или расположены близко к ней.

Выявленные изменения в профилях изученных почв валового содержания ТМ могли быть обусловлены несколькими факторами: 1) нисходящей миграцией элементов и аккумуляцией их в иллювиальных горизонтах и на геохимических барьерах; 2) утяжелением вниз почвенного профиля гранулометрического состава почвообразующих пород; 3) природным обогащением почвообразующих пород Ni, Cu, Co, Cr от продуктов разрушения близко лежащих к поверхности и даже выходящих на нее вмещающих вулканогенно-осадочных пород медно-никелевых рудных месторождений региона [Медно-никелевые месторождения Печенги, 1999].

Добычные и перерабатывающие предприятия Кольской ГМК приурочены к месторождениям сульфидных медно-никелевых руд. В ореолах рассеяния химических элементов над ними могут возникать природные геохимические аномалии с высоким содержанием Ni, Cu, Co, Cr и других химических элементов в компонентах природной среды – почвообразующих породах, почвах, растениях и животных. Поэтому последние используются как индикаторы оруденения при биологических поисках полезных ископаемых. Однако данный природный фактор аномально высокой концентрации химических элементов в компонентах природной среды естественных геохимических аномалий до сих пор редко принимается во внимание при экологической оценке ее техногенного загрязнения, а также при изучении на Кольском полуострове загрязнения почв тяжелыми металлами.

Многие растения обладают широкой экологической пластичностью к условиям произрастания, в том числе к высоким концентрациям типоморфных химических элементов в почвах геохимических аномалий. Фитоценозы на них отличаются от “фоновых” по наличию или отсутствию в них индикаторных видов растений или концентрации химических элементов в органах и тканях растений.

На фоне природных геохимических аномалий в результате многолетней деятельности предприятий Кольской ГМК возникли техногенные геохимические аномалии с высоким содержанием Ni, Cu, Co, Cr в поверхностном органогенном горизонте почв. В импактных зонах максимального загрязнения почв установлено минимальное биоразнообразие растений, их наибольшее угнетение и повреждение.

Оценка токсичности почв по критериям, предложенным Г. А. Евдокимовой [Евдокимова, 1995], выявила в импактной зоне сильную токсичность горизонта О на площадке КМ-1, где отношение $(Ca + Mg)/Cu$ менее 10, а отношение $(Ca + Mg)/Ni$ – менее 5. В буферных зонах горизонт О слабо токсичен на площадках КМ-2, КНЗ-8, КНЗ-8А и КНЗ-9, где отношения были 10–29 и 5–19 соответственно (рис. 2).

На всех площадках почвенный слой 5–20 см был нетоксичным, отношения в нем $(Ca + Mg)/Cu$ и $(Ca + Mg)/Ni$ превышали 30 и 20 соответственно. В целом значения этих отношений увеличивались в направлении от импактной зоны к фоновой территории. В этом же направлении возрастает биоразнообразие растений, что указывает на его связь с токсичностью почв. Наиболее заметно это в профиле 1 по сравнению с профилем 2 (см. табл. 1).

Оценка корреляции между изменениями биоразнообразия фитоценозов и свойств почв в почвенно-геохимических профилях 1 и 2 не выявила статистически значимой связи количества видов растений с показателями плодородия почв – концентраций подвижной формы фосфора и калия в органогенном слое 0–5 см и их запасами в слое почвы 0–15 см. Значения коэффициентов корреляции были статистически не значимы, возможно, из-за малого количества пробных площадок (табл. 4).

Значения коэффициентов корреляции в обоих профилях доказывают отрицательное влияние на биоразнообразие повышения валового содержания меди и концентрации подвижного никеля в почве, в профиле 1 такая связь проявилась с повышением валового содержания кобальта и концентрации подвижной формы меди и хрома в почвах. В профиле 2 – с повышением валового содержания хрома и уменьшением кислотности почв в результате их техногенного загрязнения.

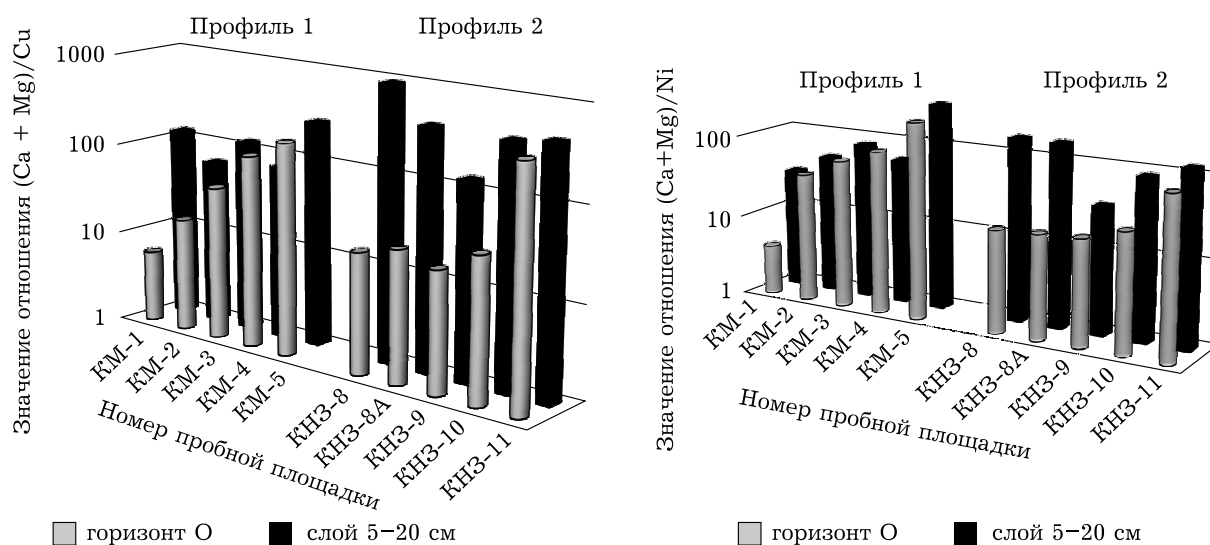


Рис. 2. Отношения подвижных форм $(Ca+Mg)/Cu$ и $(Ca+Mg)/Ni$ в поверхностном горизонте О и подстилающем его 5–20 см слое почв на пробных площадках профилей 1 и 2

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты корреляции между биоразнообразием видов растений и свойствами почв

pH _{KCl}	pH _{H₂O}	Валовое содержание, мг/кг				Подвижная форма, мг/кг						Запасы, кг/га	
		Ni	Cu	Co	Cr	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ni	Cu	Co	Cr	P ₂ O ₅	K ₂ O
Профиль 1 – “Североникель”													
-0,73	-0,63	-0,67	-0,93	-0,88	-0,29	0,19	0,74	-0,89	-0,88	-0,81	-0,91	-0,61	-0,46
Профиль 2 – “Печенганикель”													
-0,90	-0,95	-0,84	-0,88	-0,85	-0,94	0,56	0,78	-0,86	-0,83	-0,57	-0,87	0,64	0,64

П р и м е ч а н и е. Жирным шрифтом выделены статистически значимые связи.

Отсутствие статистически значимых и однозначных корреляций между плодородием почв и видовым разнообразием фитоценозов может быть следствием не только малой выборки, но и не учтенных в исследовании факторов воздействия на него, в том числе антропогенного воздействия, специфики биогеохимического круговорота химических элементов, роли в нем их содержания в почвах.

Полученные данные подтвердили способность растений произрастать и сохранять разнообразие видов даже при высоких концентрациях тяжелых металлов в почвах [Kabata-Pendias, 2011], а также установленное ранее несогласование состояния экосистем с уровнем концентрации металлов-загрязнителей в верхних органогенных слоях почв [Кашулина, 2017].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетняя добыча и переработка сульфидных медно-никелевых руд предприятиями Кольской ГМК в г. Мончегорске и пгт. Никель привели к формированию на разном удалении от них импактной и буферных зон воздействия.

Наиболее сильное загрязнение почв Ni, Cu, Co, Cr и высокая их подвижность сохраняются в импактной зоне, где отношения подвижных Cu и Ni к Ca и Mg в поверхностных органогенных горизонтах указывают на их фитотоксичность. В этой зоне растения несут морфологические признаки кислотного повреждения, а их видовое разнообразие минимально.

Высокое содержание Ni, Cu, Co, Cr в почвах и почвообразующих породах импактных зон может быть обусловлено не только

техногенным загрязнением, но влиянием природных геохимических аномалий над рудными месторождениями, к которым приурочены предприятия Кольской ГМК.

На фоне природных геохимических аномалий вблизи ее добычных и перерабатывающих предприятий сформировались техногенные геохимические аномалии, при удалении от которых в почвах снижается содержание и подвижность Ni, Cu, Co, Cr, а в фитоценозах возрастает видовое разнообразие растений.

Статистическая значимость корреляции между биоразнообразием растений и показателями плодородия почв не доказана. Установлена статистически значимая отрицательная корреляционная зависимость между валовым содержанием меди, концентрацией подвижной формы никеля в слое 0–5 см органо-генных почв.

В буферных зонах среднего и слабого воздействия высокие концентрации Ni, Cu, Co, Cr в слое 0–5 см органо-генных почв не оказывают негативного воздействия на состояние растений, их биоразнообразие.

Вклад авторов

Сысо А. И. – концептуализация, администрирование проекта, ресурсы, написание; Ермолов Ю. В. – методология, исследование, визуализация; Зибзев Е. Г. – методология, исследование, написание; Сиromля Т. И. – формальный анализ, визуализация, редактирование; Худяев С. А. – методология, исследование, формальный анализ; Черевко А. С. – исследование, анализ. Все авторы прочитали и одобрили окончательную версию рукописи.

Финансирование

Исследование выполнено по научным темам государственных заданий Института почвоведения и агрохимии СО РАН (№ 121031700309-1 и № 121031700316-9), Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (проект ААА-А-А21-121011290026-9). Работы велись в рамках проекта по изучению биоразнообразия Российской Арктики “Большая научная экспедиция” при финансовой и организационной поддержке ГМК “Норильский никель”.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Баркан В. Ш., Лянгузова И. В. Изменение уровня загрязнения органо-генного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов при уменьшении аэротехногенной нагрузки (Кольский полуостров) // Почвоведение. 2018а. № 3. С. 338–346. [Barkan V. Sh., Lyanguzova I. V. Changes in the degree of contamination of organic horizons of Al-Fe-humus podzols upon a decrease in aerotechnogenic loads, the Kola peninsula // Eur. Soil Sci. 2018a. Vol. 51, N 3. С. 327–335. (In Russ.)].
- Баркан В. Ш., Лянгузова И. В. Эколого-геохимическая оценка содержания поллютантов в бугристых болотах Кольского полуострова // Почвоведение. 2018б. № 12. С. 1464–1477. [Barkan V. Sh., Lyanguzova I. V. Eco-geochemical assessment of the content of pollutants in hummocky bogs of the Kola peninsula // Eur. Soil Sci. 2018b. Vol. 51, N 12. P. 1427–1439. (In Russ.)].
- Евдокимова Г. А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. 272 с.
- Евдокимова Г. А., Калабин Г. В., Мозгова Н. П. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия газовой воздушных выбросов комбината “Североникель” // Почвоведение. 2011. № 2. С. 261–268. [Evdokimova G. A., Kalabin G. V., Mozgova N. P. Contents and toxicity of heavy metals in soils of the zone affected by aerial emissions from the Severonikel enterprise // Eur. Soil Sci. 2011. Vol. 44, N 2. P. 237–244. (In Russ.)].
- Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Корнейкова М. В. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия газовой воздушных выбросов комбината “Печенганикель” // Почвоведение. 2014. № 5. С. 625–631. [Evdokimova G. A., Mozgova N. P., Korneykova M. V. The content and toxicity of heavy metals in soils affected by aerial emissions from the Pechenganikel plant // Eur. Soil Sci. 2014. Vol. 47, N 5. P. 504–510. (In Russ.)].
- Ежов А. Ю. Техногенное загрязнение тяжелыми металлами ландшафтов Северо-Запада Кольского полуострова // Вестн. МГОУ. Сер. Естественные науки. 2010. № 1. С. 98–103.
- Елсукова Е. Ю., Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю. Техногенная трансформация потоков тяжелых металлов в зоне воздействия медно-никелевого производства // Междунар. науч.-исслед. журн. 2019. № 12-1 (90). С. 118–124.
- Кашулина Г. М. Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2017. № 7. С. 860–873. [Kashulina G. M. Extreme pollution of soils by emissions of the copper-nickel industrial complex in the Kola peninsula // Eur. Soil Sci. 2017. Vol. 50, N 7. P. 837–849. (In Russ.)].
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с. [Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Oikumena, 2004. 341 p. (In Russ.)].
- Когарко Л. Н. Геохимия суперкрупных месторождений Восточной Феноскандии (Кольский полуостров) // Геохимия. 2021. Т. 66, № 11. С. 1020–1034. [Kogarcko L. N. Geochemistry of super-large deposits of Eastern Fennoscandia (Kola peninsula) // Geochem. Internat. 2021. Vol. 59, N 11. P. 1063–1076].

- Копчик Г. Н., Копчик С. В., Смирнова И. Е. Альтернативные технологии ремедиации пустошей в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375–1391. [Koptsik G. N., Koptsik S. V., Smirnova I. E. Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the Kola Subarctic // Eur. Soil Sci. 2016. Vol. 49, N 11. P. 1294–1309. (In Russ.).]
- Лукина Н. В., Орлова М. А., Исаева Л. Г. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва – растительность // Лесоведение. 2010. № 5. С. 45–56.
- Лянгузова И. В., Гольдвирт Д. К., Фадеева И. К. Пространственно-временная динамика загрязнения Al-Fe-подзола в зоне влияния комбината цветной металлургии // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1261–1276. [Lyanguzova I. V., Goldvirt D. K., Fadeeva I. K. Spatiotemporal dynamics of the pollution of Al-Fe-humus podzols in the impact zone of a nonferrous metallurgical plant // Eur. Soil Sci. 2016. Vol. 49, N 10. P. 1189–1203. (In Russ.).]
- Медно-никелевые месторождения Печенги. М.: ГЕОС, 1999. 236 с.
- Полевая геоботаника. М.; Л.: Наука, 1964. Т. 3. 530 с.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants/ Fourth Editions. CRC Taylor and Francis Group, 2011. 505 p.
- Reimann C., Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors // Sci. Total Environ. 2005. Vol. 337. Iss. 1-3. P. 91–107.
- Paton G. I., Viventsova E., Kumpene J., Wilson M. J., Weitz H. J., Dawson J. J. An ecotoxicity assessment of contaminated forest soils from the Kola Peninsula // Sci. Total Environ. 2006. Vol. 355. Iss. 1-3. P. 106–117.

The impact of the plants Kola Metallurgical Company on soils and plants

A. I. SYSO¹, YU. V. ERMOLOV¹, E. G. ZIBZEEV², T. I. SIROMLYA¹, S. A. KHUDYAEV¹, A. S. CHEREVKO¹

¹ *Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS
8/2, Akademika Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russia*

² *Central Siberian Botanical Garden of SB RAS
101, Zolotodolinskaya st., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: syso@issa-siberia.ru, syso@mail.ru*

The article presents the results of the study of soil properties and composition, as well as species diversity of plant coenoses in areas located at different distances from the enterprises of the Kola Metallurgical Company (KMC) in the Monchegorsk city and Nickel municipal settlement. The impacted areas were found to have maximal concentrations of Ni, Cu, Co. The ratios of soil mobile Cu and Ni to Ca and Mg in the organogenic topsoil horizons indicated their phytotoxicity. The plants in such areas showed morphological signs of acidic damage, their species diversity being minimal. High soil content of Ni, Cu, Co, Cr was suggested to be resultant not only from the technogenic contamination, but also by the natural geochemical anomalies above the ore deposits, as the GMC enterprises are located in the vicinity of such deposits. Technogenic geochemical anomalies had developed near the GMC enterprises; soil Ni, Cu, Co, Cr content and mobility were shown to decrease with increasing distance from the enterprises, whereas plant species diversity increased. Some weak and confounding correlations were revealed between plant biodiversity and soil properties, the correlation being statistically significant for soil Cu and Ni.

Key words: heavy metals, contamination, soils, plants, phytocoenosis, coenotic diversity, Kola peninsula.