

Влияние предприятий Норильского промышленного района на растительность и почвы (на примере трех экологических трансект)

Н. А. СОКОЛОВА¹, М. Ю. ТЕЛЯТНИКОВ², А. И. СЫСО¹, А. Н. БЕСПАЛОВ¹, Д. А. СОКОЛОВ¹

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2
E-mail: nsokolova@issa-siberia.ru

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

Статья поступила 17.10.2024

После доработки 24.10.2024

Принята к печати 25.11.2024

АННОТАЦИЯ

Спецификой почв Норильского промышленного района (НПР) являются аномально высокие естественные концентрации тяжелых металлов (ТМ), в частности Ni и Cu. В таких условиях дополнительное поступление загрязнителей в почвы с высокой кислотностью снижает устойчивость микрофлоры почв и увеличивает риски гибели растительности. В предыдущие десятилетия выявлено негативное воздействие пылеаэрозольных выбросов промышленных предприятий НПР, содержащих SO₂, Ni и Cu, на состояние почв и накопление ТМ в растительности. Целью данного исследования является оценка современного состояния почв и растительности в пределах зон воздействия предприятий НПР различного характера и выявление степени их влияния. На примере трех экологических трансект оценено воздействие длительного пылеаэрозольного и однократного контактного химического загрязнения, а также механической трансформации в зоне строительства промышленных объектов. Влияние пылеаэрозольного загрязнения зафиксировано на всех трансектах, на двух из которых отмечены наибольшие значения показателя степени антропогенной трансформации растительности (0,5–1). Наиболее негативное влияние отмечается на участках, где на пылеаэрозольное загрязнение накладывается контактное химическое загрязнение. Фактор контактного химического воздействия помимо изменения состава и свойств приводит к изменению строения профилей почв. Фактор механической трансформации оказывает заметное воздействие как на состав фитоценозов, так и на строение профиля почв. При этом содержание ТМ при механической трансформации не превышает показатели, характерные для геохимического фона. Восстановление растительности и почв на таких участках начинается сразу после прекращения механического воздействия.

Ключевые слова: пылеаэрозольное загрязнение, тяжелые металлы, степень антропогенной трансформации, криометаморфические почвы, структура фитоценозов.

ВВЕДЕНИЕ

Норильский промышленный район (НПР) возник на минерально-сырьевой базе сульфидных медно-никелевых месторождений Таймы-

ро-Норильской платиноидно-медно-никелевой провинции. Рудопроявления района обусловили формирование здесь природной геохимической аномалии с повышенным содер-

жанием Cu, Ni и Co в почвах естественных ландшафтов. Добыча и переработка руд привели к загрязнению окружающей среды, возникновению техногенных ландшафтов и природно-техногенной геохимической аномалии с почвами и техногенными грунтами с более высокими, чем в естественных почвах, концентрациями Cu, Ni и Co, а также S-SO₄ и других веществ [Сысо и др., 2022]. Влияния природного обогащения почв Cu, Ni и Co на биоразнообразие растений и животных, экосистемы Таймыра не установлено, в отличие от воздействия техногенных выбросов, сбросов и отходов. При добыче и обогащении медных и никелевых руд в качестве загрязняющих веществ выступают оксиды серы и азота, а также ионы тяжелых металлов (ТМ), которые с газопылевыми выбросами попадают в атмосферу и почвы окружающих территорий и ландшафтов. Мировая практика показывает, что оксиды серы и азота в первую очередь негативно влияют на растительный покров, в результате чего происходит снижение биоразнообразия и продуктивности растительных сообществ [Васильева и др., 2000; Телятников, Пристяжнюк, 2014; Кравцова, Железный, 2022]. Влияние ТМ прежде всего сказывается на почвенном покрове, в результате чего меняется его гумусное состояние, кислотность, снижается плодородие, деградирует почвенная микрофлора [Водяницкий и др., 2010; Евдокимова и др., 2014; Ладонин, 2016]. Также заметное влияние на природные экосистемы оказывают жидкие стоки производства и механическая трансформация при строительстве и эксплуатации производственных объектов.

Следует отметить, что спецификой почв НПП являются аномально высокие естественные концентрации тяжелых металлов, в частности Ni и Cu, которые часто превышают допустимые значения российских нормативов [Сысо и др., 2022]. В таких условиях дополнительное поступление поллютантов при контактом химическом загрязнении почв с высокой кислотностью снижает устойчивость микрофлоры почв и увеличивает риски гибели растительности. Наиболее наглядно это продемонстрировано при изучении последствий аварийных сбросов хвостов (пульпы) на аналогичных объектах Башкирии. Результатом этого часто оказывается частичная или полная деградация как почв, так и расти-

тельности [Бактыбаева и др., 2011]. Механическая антропогенная трансформация экосистем близка к природной механической трансформации, происходящей в результате экзогенных явлений денудации и аккумуляции грунтов и полного или частичного уничтожения растительного и почвенного покрова.

Таким образом, в предыдущие десятилетия выявлено негативное воздействие пыле-аэрозольных выбросов промышленных предприятий НПП, содержащих SO₂, Ni и Cu, на состояние почв и накопление ТМ в растительности [Ермолов и др., 2020, 2023]. Целью данного исследования является оценка современного состояния почв и растительности в пределах зон воздействия предприятий Норильского промышленного района различного характера и выявление степени их влияния.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования на территории Норильского промышленного района выполнялись в рамках Большой научной экспедиции по договору ГМК “Норильский никель” и Сибирского отделения РАН. Специфика природных условий исследуемой территории определяет особенности физико-химических свойств почв и аккумуляции в них ТМ. Криометаморфические почвы тундр западных предгорий плато Путорана характеризуются высоким содержанием органического вещества в верхней 10-сантиметровой толще (10–25 %) с резким дальнейшим снижением по профилю, кислой реакцией почвенного раствора (pH_{сол} 3,7–4,7), при общем суглинисто-глинистом гранулометрическом составе, преобладанием пылевой фракции и формированием специфической мелкогранулированной криогенной структуры [Сеньков, 2014]. Таким образом, резкая дифференциация содержания органического вещества по профилю способствует аккумуляции ТМ в верхней его части (0–10 см), а кислая реакция среды и малое содержание илистых фракций – увеличению доли подвижных соединений. Почвы на территории НПП характеризуются высокой степенью нарушенности [Яковлев и др., 2008].

Объекты исследования

Объектами исследования выбраны почвы и растительные сообщества, подверженные

антропогенному влиянию в пределах НПП. Наибольшее влияние на природные объекты оказывают, как правило, предприятия, связанные с обогащением руд цветных металлов, так как отходы производства несут опасность для растений и животных. Особенно неблагоприятно на почвы и растительный покров влияет размещение хвостов (объекты размещения отходов (ОРО), хвостохранилища), так как под их размещение отводят значительные площади. Кроме того, они могут являться источником пыли [Ермолов и др., 2023]. Попадание пыли на поверхность почв прилегающих территорий, характеризующихся кислой реакцией среды, сопряжено с дальнейшим увеличением подвижности ТМ, их постепенным выщелачиванием и попаданием путем водной миграции в открытые речные системы. Следует отметить, что ущерб естественным экосистемам при воздействии химически активных оксидов (серы, азота) проявляется сразу, а действие ТМ является накопительным. Наи-

большему влиянию подвержены территории, прилегающие к промышленным объектам со стороны преобладающих ветров. В связи с этим рассмотрены естественные экосистемы, расположенные в соответствии с розой ветров по трем трансектам от основных обогатительных предприятий городского округа Норильска (рис. 1). Точки ННц 1, ННц 3, ННц 4 (трансекта 1) находятся на расстоянии от 3,5 до 10,5 км к юго-востоку от цементного завода г. Норильска на слабохолмистой моренной равнине вдоль подножия гряды Ергалах. Данная трансекта представлена зоной пылеаэрозольного влияния никелевого завода г. Норильска, действовавшего с 1943 по 2016 г.

Точки ННхв 7, ННхв 8/2, ННхв 10 (трансекта 2) расположены на расстоянии от 0,7 до 4 км к северо-западу от хвостохранилища “Лебяжье” на плоскобугристой моренной равнине в бассейне р. Купец. Объекты данной трансекты подвержены влиянию ОРО медного завода г. Норильска, функционирующего

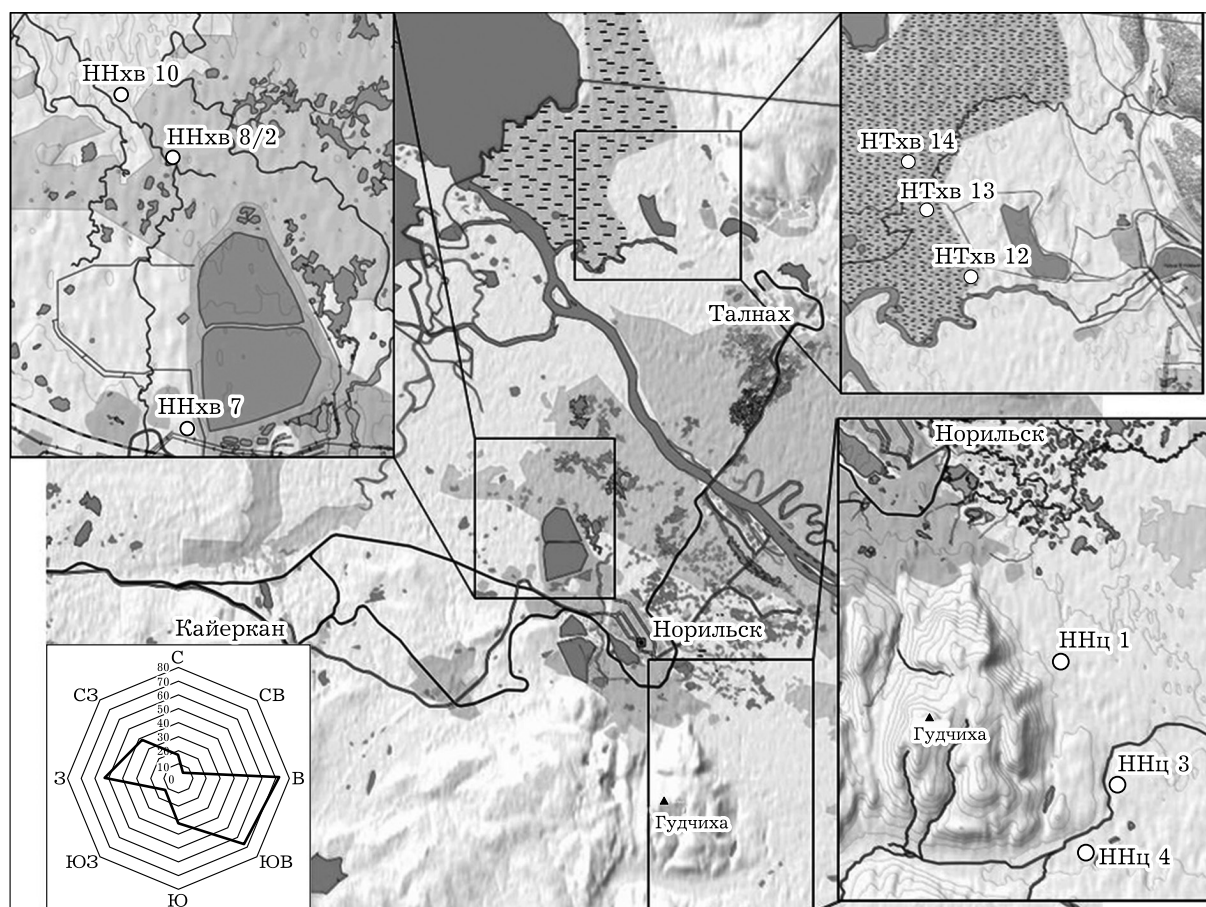


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб и ботанических описаний

с 1949 г., и Надеждинского металлургического комбината.

Точки НТхв 12, НТхв 13, НТхв 14 (трансекта 3) расположены на расстоянии от 0,1 до 1,5 км к северо-западу от хвостохранилища Талнахской обогатительной фабрики, действующей с 1981 г., на плоской равнине в долине р. Норильская.

Почвы на всех указанных точках отнесены к типу криометаморфических, что позволяет проследить характер и степень антропогенного воздействия.

Методы исследования

Ботанические описания, закладка почвенных разрезов и отбор образцов для аналитических исследований проведены в июле 2023 г. Для выявления фиторазнообразия растительных сообществ нарушенных местообитаний выполнены геоботанические описания растительности, соответствующие общепринятой методике [Лавренко, Корчагина, 1964; Вальтер, 1982]. Всего сделано 41 полное геоботаническое описание, площадь каждого из них составила от 30 до 100 м². На площадках выявлялся полный видовой состав фитоценозов. Элементы микрокомплексов (фитоценозы) описывались отдельно. Координаты площадок и абсолютную высоту определяли с помощью GPS-навигатора (Garmin eTrex 10). Математическая обработка описаний нами проведена с применением программ MegaTab [Hennekens, 1996] и TWINSpan [Hill, 1979]. Описанные сообщества классифицировались и были выделены сходные по видовому составу группы – фитоценозы. Всего выделено шесть таких первичных групп. Из-за отсутствия в районах исследования фоновой растительности, необходимой для сравнения с трансформированными участками, нами использовались индексы, позволяющие дать оценку степени деградации растительности без привлечения фоновых показателей: 1 – видовой разнообразия сообщества (общее число видов растений), 2 – степени антропогенной трансформации фиторазнообразия растительного сообщества, который рассчитывается как отношение видов синантропных (устойчивых к антропогенному воздействию) к видам естественных местообитаний (как правило, не устойчивых к загрязнению).

Названия сосудистых растений цитируются по Н. А. Секретаревой [2004], мхов – по М. С. Игнатову и соавт. [Игнатов и др., 2006], лишайников – по Т. L. Esslinger [2016].

Морфологическое описание и диагностика почв выполнены в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России [Шишов и др., 2004] и Полевым определителем почв [2008]. Аналитические исследования образцов почв проводились стандартными в почвоведении методами: pH солевой суспензии – по ГОСТ 26483-85; определение гранулометрического состава – по методу Качинского [Качинский, 1958] (пирофосфатный метод); содержание органического углерода – окислением бихромата калия по методу Тюрина [ГОСТ 26213-91]; емкость катионного обмена – по методу Каппена в модификации ЦИНАО [ГОСТ 17.4.4.01-84]; общее содержание химических элементов в почвах – методом атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы по ГОСТ ISO 22036-2014; содержание подвижных форм микроэлементов – атомно-абсорбционным методом в вытяжке ацетатно-аммонийного буферного раствора (ААБ pH 4,8) [РД 52.18.289-90].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Классификация растительности трансект позволила выделить шесть групп фитоценозов, различающихся как по флористическому составу, так и по отношению к преобладающим антропогенным факторам.

К группе сообществ, испытывающих влияние фактора воздушного загрязнения, отнесены следующие фитоценозы: хвощевая, злаковая и ивняковая стадии деградации, а также антропогенно трансформированные сообщества лесотундровых редколесий (табл. 1). Основными индикаторными признаками преобладания фактора воздушного загрязнения выступает отсутствие или низкая доля участия в данных растительных сообществах лишайников и зеленых мхов, преобладание ив, злаков и хвощей, наличие сухих стволов лиственницы и березы.

Хвощевая стадия деградации. Сообщества приурочены к выположенным участкам слабых холмистой моренной равнины (подножие гряды Ергалах). Характерные виды: *Cerastium jenisejense* Hultén, *Deschampsia boreali* (Trautv.) Roshev., *D. sukatschewii* (Popl.) Roshev.,

Т а б л и ц а 1
Видовой состав растительных сообществ трансект

Показатель, вид растения	Ярус	Трансекта и площадки								
		1			2			3		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер площадки		ННц	ННц	ННц	ННхв	ННхв	ННхв	НТхв	НТхв	НТхв
		1	3	4	7	8/2	10	12	13	14
Номер в базе данных		8	4	1	32	38	41	21	18	16
Номера полевых описаний		7	3	1	22	24	26	15	13	12
Порядковый номер в таблице*		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество видов		19	14	18	5	15	10	28	20	23
Общее проективное покрытие, %		70	40	85	50	80	60	70	100	100
<i>Alnus fruticosa</i> Rupr.	вк	.	.	.	.	3	.	1	.	.
<i>Salix bebbiana</i> Sarg.	вк	.	.	.	.	2	.	.	.	.
<i>Salix jenisseensis</i> (F. Schmidt) Flod.	вк	.	.	3	.	20	.	.	.	.
<i>Betula tortuosa</i>	д	.	.	.	.	.	.	2	.	.
<i>Larix gmelinii</i>	д	.	.	.	.	5	5	3	.	1
<i>Betula nana</i>	к	.	.	.	.	5	3	.	35	25
<i>Ribes triste</i> Pall.	к	.	.	.	.	.	.	1	.	.
<i>Rosa acicularis</i> Lindl.	к	.	.	.	.	2	.	.	.	.
<i>Salix dasyclados</i> Wimm.	к	.	.	.	30	.	.	3	.	.
<i>Salix glauca</i>	к	10	.	.	5	3	10	.	.	2
<i>Salix hastata</i>	к	.	3	7	5	15	5	.	.	.
<i>Salix lanata</i>	к	2	.	5	5	.	.	.	.	2
<i>Salix lanata</i> L. subsp. <i>richardsonii</i> (Hook.) A. K. Skvortsov	к	.	.	.	.	2	5	.	.	.
<i>Salix lapponum</i> L.	к	.	.	.	.	.	.	2	.	.
<i>Salix phylicifolia</i> L.	к	.	.	.	.	5	.	1	.	3
<i>Salix pulchra</i> Cham.	к	.	.	.	4	.	.	.	.	.
<i>Salix pyrolifolia</i> Ledeb.	к	.	.	.	.	.	2	.	.	.
<i>Salix saxatilis</i> Turcz. ex Ledeb.	к	3	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Empetrum subholarcticum</i>	кч	.	.	2	.	3	8	.	3	15
<i>Ledum palustre</i> L. subsp. <i>decumbens</i> (Aiton) Lodd. ex Steud.	кч	2	2	5	.	2	.	.	10	.
<i>Linnaea borealis</i>	кч	.	.	.	.	.	.	1	.	.
<i>Salix reticulata</i> L.	кч	1	2	.	.	.	.	.	.	.
<i>Vaccinium uliginosum</i> subsp. <i>microphyllum</i>	кч	.	.	.	.	2	.	1	12	20
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	кч	.	.	.	.	.	.	1	4	.
<i>Vaccinium vitis-idea</i> L. subsp. <i>minus</i> (Lodd.) Hult.	кч	1	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Baeomyces carneus</i> Flörke	л	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Baeomyces rufus</i> (Huds.) Rebent.	л	.	.	.	.	.	.	.	1	.
<i>Cetraria islandica</i>	л	.	.	.	.	.	.	.	2	5
<i>Cladon gracilis</i> (L.) Willd. subsp. <i>elongata</i> (Wulfen) Vain.	л	.	.	.	.	.	.	.	.	5
<i>Cladonia amaurocraea</i> (Flörke) Schaer.	л	.	.	.	.	.	.	.	.	4
<i>Cladonia arbuscula</i> (Wallr.) Flot.	л	.	.	.	.	.	.	.	.	8
<i>Cladonia bacillaris</i> Ach.	л	.	.	.	.	.	.	.	1	.
<i>Cladonia</i> sp.	л	.	.	.	.	.	.	.	2	.
<i>Cladonia stygia</i> (Fr.) Ruoss	л	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Flavocetraria cucullata</i>	л	.	.	.	.	.	.	.	3	6
<i>Flavocetraria nivalis</i> (L.) Kärnefelt et A. Thell	л	.	.	.	.	.	.	.	.	2
<i>Dicranella cerviculata</i> (Hedw.) Schimp.	м	.	6	.	.	.	.	.	.	.
<i>Gymnocola inflata</i> (Huds.) Dumort.	м	.	6	.	.	.	.	.	.	.

1	2	3	4	5
<i>Pohlia nutans</i> (Hedw.) Lindb.	м	12	8	25
<i>Pohlia</i> sp.	м	.	.	.
<i>Polytrichum hyperboreum</i> R. Br.	м	.	.	.
<i>Polytrichum juniperinum</i> Hedw.	м	.	.	.
<i>Polytrichum strictum</i> Brid.	м	.	.	.
<i>Ptilidium ciliare</i> (L.) Hampe	м	.	.	.
<i>Scapania</i> sp.	м	.	.	.
<i>Arctagrostis latifolia</i>	т	.	.	.
<i>Bistorta major</i> S. F. Gray	т	1	.	1
<i>Bistorta vivipara</i> (L.) Delarbre	т	1	.	2
<i>Calamagrostis lapponica</i> (Wahlb.) Hartm.	т	.	.	.
<i>Calamagrostis neglecta</i> (Ehrh.) Gaertn., Mey. et Schreb.	т	.	5	25
<i>Calamagrostis purpurea</i> subsp. <i>langsdirffii</i>	т	.	3	4
<i>Carex bigelowii</i> Torr. ex Schwein. <i>arctisibirica</i> (Jurtzev) A. et D. Löve	т	2	.	.
<i>Carex canescens</i>	т	.	.	.
<i>Carex lapponica</i>	т	.	.	.
<i>Carex pediformis</i> C. A. Mey.	т	.	.	.
<i>Cerastium jenisejense</i> Hultén	т	1	.	.
<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	т	.	2	4
<i>Dendranthema mongolicum</i> (Ling) Tzvelev	т	.	.	1
<i>Deschampsia borealis</i>	т	3	.	.
<i>Equisetum arvense</i> subsp. <i>boreale</i>	т	4	.	5
<i>Equisetum variegatum</i> Schleich. ex Web. et Mohr	т	7	.	.
<i>Erigeron acris</i> L.	т	.	.	.
<i>Eriophorum vaginatum</i>	т	.	.	.
<i>Festuca altaica</i> Trin.	т	.	2	.
<i>Festuca brachyphylla</i> Schult. et Schult. fil.	т	.	.	.
<i>Gastrolychnis angustiflora</i> Rupr. subsp. <i>tenella</i> (Tolm.) Tolm. et Kozhanch.	т	.	.	.
<i>Hierochloë odorata</i> Beauv. <i>arctica</i>	т	11	.	.
<i>Luzula parviflora</i> (Ehrh.) Desv.	т	.	.	.
<i>Myosotis asiatica</i>	т	.	.	.
<i>Oxytropis adamsiana</i> (Trautv.) Jurtzev	т	.	.	.
<i>Papaver lapponicum</i> (Tolm.) Nordh. subsp. <i>orientale</i> Tolm.	т	3	.	.
<i>Pedicularis labradorica</i> Wirsing	т	.	.	.
<i>Petasites frigidus</i> (L.) Fr.	т	.	.	2
<i>Poa alpigena</i>	т	8	3	1
<i>Rubus chamaemorus</i> L.	т	.	.	3
<i>Rumex arcticus</i> Trautv.	т	.	.	1
<i>Rumex lapponicus</i> (Hiitonen) Czernov	т	.	1	.
<i>Saussurea parviflora</i> (Poir.) DC.	т	.	.	1
<i>Saxifraga aestivalis</i> Fisch. et C. A. Mey.	т	.	.	.
<i>Stellaria peduncularis</i> Bunge	т	1	1	.
<i>Tanacetum boreale</i> Fisch. ex DC.	т	.	1	.
<i>Taraxacum ceratophorum</i> (Ledeb.) DC.	т	1	.	.

П р и м е ч а н и е. * – порядковый номер в таблице означает: 1 – хвощевая стадия деградации, 2, 3 – злаковая стадия деградации, 4 – ивняковая стадия деградации, 5, 6 – антропогенно трансформированные сообщества лесотундровых редколесий, 7 – злаково-иванчаевая стадия зарастания, 8, 9 – тундры ерничково-кустарничковые с участием мхов и лишайников. вк – высокие кустарники; д – деревья; к – кустарники; кч – кустарнички; л – лишайники; м – мохообразные; т – травы.

Equisetum arvense L. subsp. *boreale* (Bong.) Tolm. Общее проективное покрытие растений составляет 70 %. Видовое разнообразие – 19 видов.

Злаковая стадия деградации. Ценозы занимают выположенные участки, а также пологие склоны увалов холмистой предгорной равнины Ергалах. Характерные виды: *Calamagrostis neglecta* (Ehrh.) Gaertn., B. Mey. et Schreb., *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *Poa alpigena* Lindm., *Salix hastata* L. Общее проективное покрытие 40–85 %. Видовое разнообразие – 14–18 видов.

Ивняковая стадия деградации. Сообщества приурочены к пологому склону моренного холма, рядом с хвостохранилищем медного завода. Характерные виды: *Salix glauca* L., *S. hastata*, *S. lanata* L. Общее проективное покрытие 50 %. Видовое разнообразие – 5 видов.

Антропогенно трансформированные сообщества лесотундровых редколесий (ННхв 8/2, ННхв 10) занимают речные террасы в пойме р. Купец. Характерные виды: *Empetrum subholarcticum* V. N. Vassil., *Betula nana* L., *Salix glauca*, *S. hastata*. Общее проективное покрытие 60–80 %. Видовое разнообразие – 10–15 видов.

К сообществам, испытывающих влияние фактора механической трансформации, отнесен один фитоценоз – злаково-иванчаевая стадия зарастания (см. табл. 1). Воздействие фактора проявляется в том, что в сообществах наряду с синантропными видами (злаки, ивы) присутствуют живые экземпляры березы (*Betula tortuosa* Ledeb.) и лиственницы (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), что свидетельствует о слабом влиянии фактора воздушного загрязнения и преобладании фактора механической трансформации.

Трансекта 1. Растительность трансекты 1 представлена хвощевой и злаковой стадиями деградации. По мере удаления от г. Норильска (от площадки ННц 1 к площадке ННц 4) сначала прослеживается небольшое снижение индекса антропогенной трансформации фито-разнообразия (с 0,58 до 0,50), а затем он возрастает до 0,61 (см. табл. 1). Ведущий фактор – воздушное загрязнение поллютантами, о чем говорит состав растительных сообществ, представленных в основном видами, устойчивыми к воздействию диоксида серы: ивы (*Salix glauca*, *S. hastata*, *S. reticulata* L.), злаки (*Calamagrostis purpurea* (Trin.) Trin. subsp. *langsdirffii* (Link) Tzvel., *C. neglecta*, *Deschampsia*

borealis (Trautv.) Roshev., *Hierochloë odorata* (L.) Beauv. subsp. *arctica* (C. Presl) Tzvel., *Poa alpigena* Lindm.). Также об этом свидетельствуют отсутствие в ценозах лишайников и низкая доля зеленых мхов [Телятников, Пристяжнюк, 2014].

На данной трансекте в профилях рассматриваемых почв не обнаруживается явных признаков механических нарушений; почвы имеют характерное строение и набор горизонтов (Оао/АО – CRM–С₁) (рис. 2). Однако можно отметить, что по мере удаления от источника антропогенного воздействия увеличивается мощность органогенного горизонта (от 5 см – горизонт Оао – в точке ННц 1 до 11 см – горизонт АО – в точке ННц 4), а степень разложения органического материала, напротив, снижается. Морфологических изменений окраски и структуры криометаморфического горизонта CRM также не отмечено: во всех трех профилях он серо-бурый, сырой, рыхлый до уплотненного, угловато-крупитчатый. В то же время глубина залегания мерзлой почвообразующей породы уменьшается: в точке ННц 1 линз льда не обнаружено даже на глубине 65 см, тогда как в точке ННц 4 они встречаются уже с глубины 45 см.

Трансекта 2. Растительность трансекты 2 сложена вторичными сообществами лиственных редин, а также ивняковой стадией деградации. По мере удаления от источника загрязнения от площадки ННхв 7 к площадке ННхв 10 индекс антропогенной трансформации постепенно снижается от 1 до 0,5. Господство ив и злаков, а также древесного сухостоя вблизи источника загрязнения свидетельствует о влиянии фактора воздушного загрязнения диоксидом серы. Кроме того, на данной трансекте существенно снижено как общее число видов растений, так и проективное покрытие, что говорит о наибольшей степени влияния на фитоценозы из всех рассмотренных трансект.

На данной трансекте в профилях почв ярко проявляется контактное техногенное воздействие (рис. 3). В верхней части профиля почв выделяется слой, отличающийся по окраске и составу материала от погребенных профилей криометаморфических почв. Судя по формированию на поверхности этого слоя подстилки разной мощности и ретроспективным снимкам в Google Earth, событие, спровоциро-

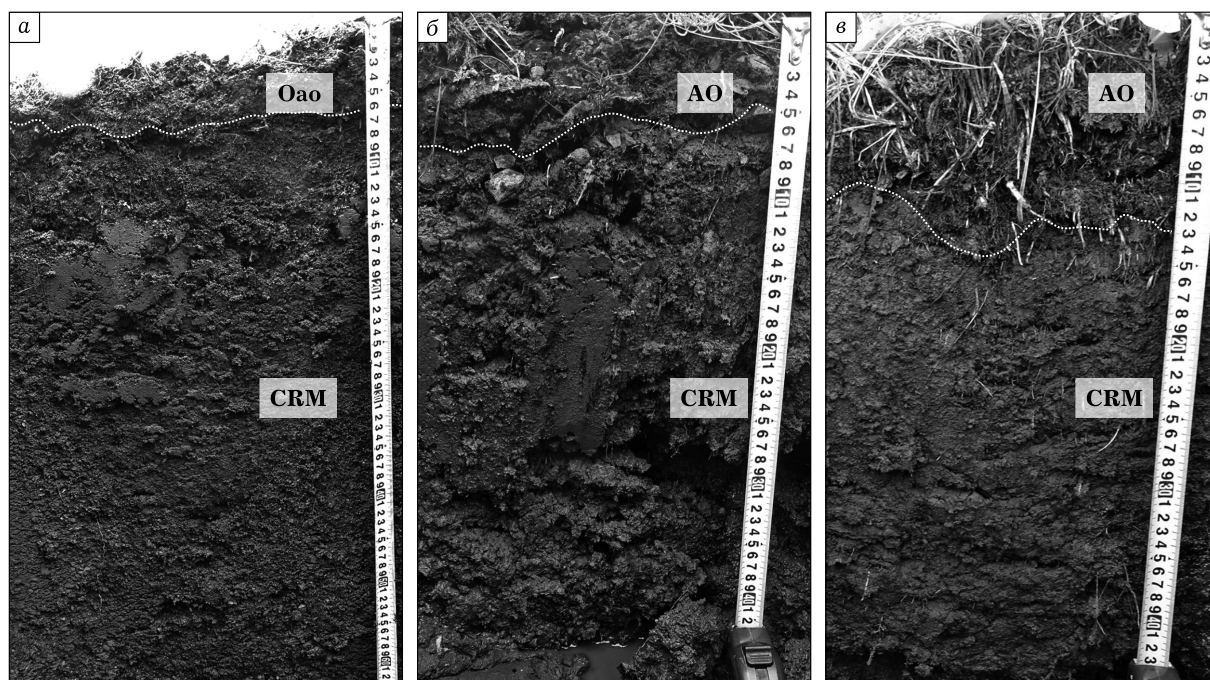


Рис. 2. Профили криометаморфических почв на трансекте 1: а – точка ННц 1; б – точка ННц 3; в – точка ННц 4

вавшее техногенный нанос, произошло более 40 лет назад, но, по-видимому, на характер современной растительности оно уже не влияет. По мере удаления от объектов техногенного воздействия степень проявления воздействия на почвы отличается. Так, мощность подстил-

ки увеличивается от точки ННхв 7 (фактически отсутствует) к точке ННхв 8/2 (фрагментарная) и далее к точке ННхв 10 (слабо выраженная), а мощность наносного слоя RO уменьшается от 17 до 7 см в том же направлении. Следует отметить, что во всех

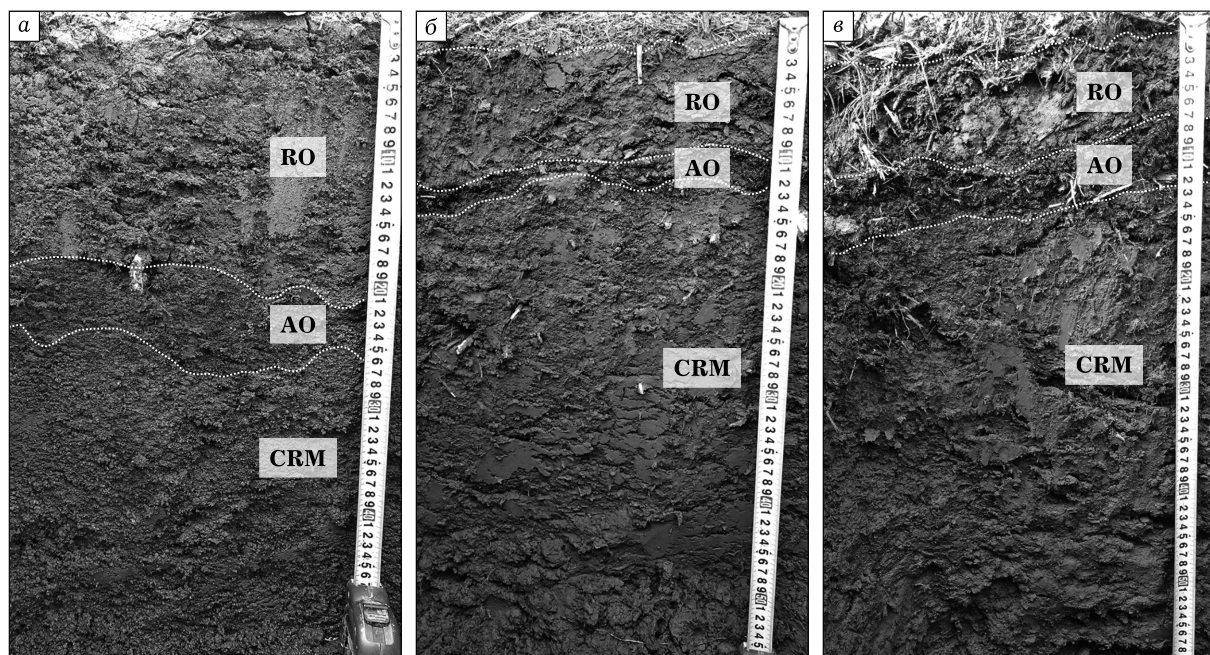


Рис. 3. Профили стратоземов на погребенных криометаморфических почвах на трансекте 2: а – точка ННхв 7; б – точка ННхв 8/2; в – точка ННхв 10

рассмотренных профилях верхний горизонт имеет признаки оржавления; они наиболее заметно проявляются в точке ННхв 8/2. Отличия проявляются и в степени трансформации погребенного грубогумусового горизонта: степень разложения грубого органического материала снижается по мере удаления от хвостохранилища. Криометаморфический горизонт CRM во всех рассмотренных профилях имеет мелкокомковато- или икрянисто-крупитчатую структуру, среднесуглинистый, рыхлый до уплотненного, однако при наибольшей степени воздействия – бурый, а в двух других профилях в верхней части – с пятнами оржавления.

Трансекта 3. Растительность трансекты 3 представлена кустарниково-кустарничковыми слабо трансформированными тундрами (площадки НТхв 13, НТхв 14) и сообществами злаково-иванчаевой стадии зарастания (НТхв 12). Факторами, влияющими на характер растительности трансекты, являются воздушное загрязнение и механическая трансформация грунтов. Увеличение воздействия антропогенных факторов проявляется в направлении от площадки НТхв 14 к площадке НТхв 12. Показатель антропогенной трансформации в этом направлении меняется от 0,26 до 0,36. О незначительности фактора воздушного загрязне-

ния кустарниково-кустарничковых тундр (площадки НТхв 13, НТхв 14) свидетельствует присутствие в этих сообществах достаточно большого количества зеленых мхов и лишайников, а также живых деревьев лиственницы. В ценозах злаково-иванчаевой стадии зарастания, сформировавшейся на месте работы гусеничной техники и расположенной вблизи хвостохранилища, заметно возрастает количество синантропных видов, представленных злаками, и снижается количество видов естественных сообществ (лишайников, мхов). Показатель антропогенной трансформации возрастает до 0,36.

В профилях почв на этой трансекте нарушения механического характера заметны только в точке НТхв 12 (стратозем грубогумусовый на погребенной криометаморфической почве) (рис. 4). В верхней части профиля ясно выделяется турбированный горизонт мощностью 38 см, включающий как грубый органический материал, так и каменистые обломки и гальку. Под ним залегает характерный для криометаморфических почв погребенный грубогумусовый горизонт мощностью 7 см, а ниже – уплотненный бурого цвета криометаморфический (CRM) с мелкокомковато-крупитчатой структурой. Профиль чуть более удаленной от хвостохранилища криоме-

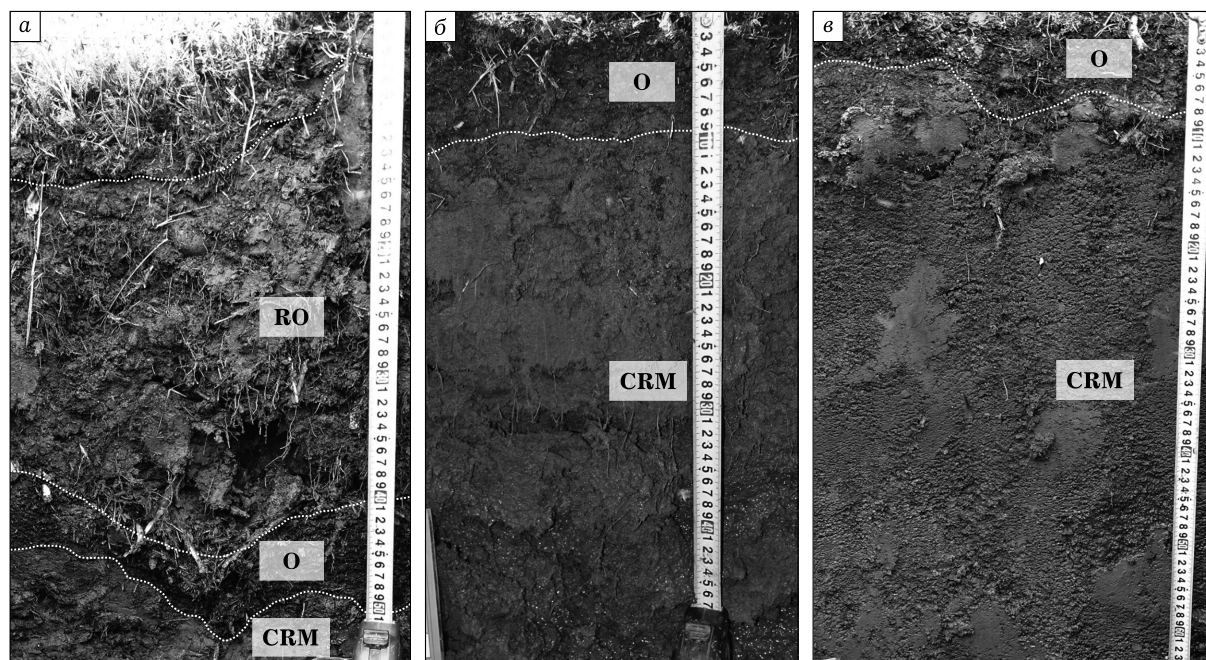


Рис. 4. Профили почв на трансекте 3: а – точка НТхв 12 (стратозем грубогумусовый на погребенной криометаморфической почве); б – точка НТхв 13; в – точка НТхв 14 (криометаморфические почвы)

таморфической почвы в точке НТхв 13 не несет явных признаков механического воздействия. Грубогумусовый горизонт мощностью 8 см не нарушен, состоит преимущественно из грубого органического материала, обильно пронизан корнями растений. В то же время криометаморфический горизонт CRM имеет нехарактерную неясно-мелкокомковатую структуру, что свидетельствует о нарушении хода естественных почвенных процессов. Профиль наиболее удаленной от хвостохранилища криометаморфической почвы в точке НТхв 14 близок к состоянию ненарушенного; состояние подстилки, состав материала грубогумусового горизонта, криогенная угловато-крупитчатая структура горизонта CRM соответствуют таковым криометаморфическим почвам вне зоны влияния предприятий НПР. В то же время льдистых образований не обнаружено даже на глубине 70 см, что указывает на отепление этих почв.

Результаты исследований основных физико-химических свойств почв представлены в табл. 2. Показано, что отмеченные выше факторы дифференциации морфологического облика почв сказываются в том числе и на основных их свойствах.

Наиболее наглядно это проявляется в содержании фракции физической глины ($<0,01$ мм). Как известно, для равнинных территорий Северо-Сибирской низменности, в южной части которой распространены криометаморфические почвы, характерны моренные суглинисто-глинистые отложения [Соколов, 1973; Ершов, 2004; Сеньков, 2014]. В целом, исследуемые почвы по причине слабой выраженности процессов текстурной дифференциации сохраняют легко- и среднесуглинистый состав в верхней 20-сантиметровой части профиля [Васильевская, 1980]. Исключением в данном случае выступают почвы транsekты 2, которые были перекрыты техногенными наносами. По всей видимости, переотложение материала поверхности могло произойти по причине постройки хвостохранилища и изменения водотоков притоков рек Купец и Щучья. Подтверждением отмеченному служит более легкий гранулометрический состав (см. табл. 2), а также наличие погребенных органических горизонтов.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почвах трансекта изменяется в широких ин-

тервалах. Максимальные его концентрации приходится на ненарушенные органогенные горизонты (до 71,6 %), минимальные – для верхних горизонтов механически нарушенных почв (до 0,6 %). Дифференцированность почв по гранулометрическому составу и содержанию органического вещества отражается также и на значениях емкости катионного обмена, которая варьирует от 9 до 100 мг-экв/100 г. Все вместе фиксируемые особенности исследуемых криометаморфических почв сказываются на их способности сорбировать тяжелые металлы и другие поллютанты [Сысо и др., 2022].

Из основных физико-химических свойств исследуемых участков особого внимания заслуживают значения pH солевой суспензии. Наиболее неблагоприятные условия для роста растений и развития растительных сообществ складываются на участках транsekты 2, где pH в наносных и исследуемой части погребенных горизонтов составляют 3,2–3,9 (среднее 3,6 при $n = 18$). Также сильноокислая реакция среды характерна для почв транsekты 3, прилегающих к хвостохранилищу Талнахской обогатительной фабрики. Значения кислотности почв здесь изменяются в более широком диапазоне (3,0–4,4) при средних 3,8 ($n = 18$). Отмеченное, как указывается в работе [Сысо и др., 2022], обусловлено насыщенностью почвенного поглощающего комплекса ионами как H^+ , так и Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} . Особое место среди почв исследуемых участков занимают почвы транsekты 1. Они характеризуются максимальным разбросом (от 3,3 до 6,6) и средними значениями pH (4,7 при $n = 18$), что, по всей видимости, обусловлено влиянием выбросов цементного завода [Ермолов и др., 2023], воздействие которых на почвы, по всей видимости, способствует нейтрализации кислотности.

Ранее установлено, что в почвах пойм рек НПР превышение ПДК по содержанию подвижных форм фиксируется только для элементов 2-го класса опасности (Co, Cu, Ni). Концентрация подвижных форм элементов 1-го класса опасности (Pb, Cd, Zn) не превышает ПДК, в том числе и на участках, подверженных техногенному воздействию [СанПиН 1.2.3685-21]. Полученные данные связаны не только с техногенным химическим загрязнением, но и с изначально высоким фоновым

Т а б л и ц а 2
Основные физико-химические свойства почв и характеристики растительного покрова на трансектах

Наименование точки	Глубина, см	Доля фракции <0,01 мм, %	pH _{KCl}	C _{орг} , %	ЕКО, мг-экв/100 г	Общее число видов растений, шт.	Число синантропных видов растений, к антропогенному воздействию	Степень антропогенной трансформации растительного сообщества
ННц 1	0-5	–	4,7	24,7	80	19	11	0,58
	5-20	35,5	4,5	1,9	58			
ННц 3	0-5	27,9	4,8	6,4	33	14	7	0,50
	5-20	25,9	6,6	2,8	23			
ННц 4	0-5	–	3,3	71,6	100	18	11	0,61
	5-20	35,5	4,3	3,2	55			
ННхв 7	0-5	25,1	3,2	1,8	36	5	5	1,00
	5-20	32,3	3,5	2,4	16			
ННхв 8/2	0-5	7,7	3,6	0,6	9	15	8	0,53
	5-20	–	3,5	17,0	80			
ННхв 10	0-5	10,9	3,6	1,6	20	10	5	0,50
	5-20	20,2	3,9	8,1	23			
НТхв 12	0-5	31,9	4,4	3,1	12	28	10	0,36
	5-20	24,4	4,4	3,7	47			
НТхв 13	0-5	–	3,0	50,7	35	20	5	0,25
	5-20	38,9	3,4	3,1	51			
НТхв 14	0-5	–	3,5	48,8	30	23	6	0,26
	5-20	32,2	3,9	1,9	60			

уровнем содержания тяжелых металлов в почвах ввиду геохимической специфики Норильского промышленного района [Сысо и др., 2022]. Оценка экологического состояния почв в районе ГМК “Норильский никель” по уровню загрязнения ТМ, состоянию растительности и биологической активности показала, что территория характеризуется не только высоким содержанием ТМ, но и отсутствием древесной растительности и нарушением минерализации органического вещества [Яковлев и др., 2008].

Результаты оценки содержания тяжелых металлов в почвах (рис. 5) трансекты 1 в целом согласуются с ранее проведенными исследованиями [Васильевская, 1980; Яковлев и др., 2008] и выявили повышенные концентрации таких элементов, как Co, Cu, Ni. В то же время практически для всех исследуемых элементов (Co, Cu, Ni, Pb) наблюдается снижение как общего их содержания в почвах, так и концентраций подвижных форм по мере удаления от источников загрязнения. Степень подвижности элементов при этом для каждой точки варьирует (1,2–9 %), но в целом слабо связана с расстоянием от промышленных предприятий. Наибольшей долей подвижных

форм в почвах характеризуются медь и никель (4–9 %).

В почвах трансекты 2 наблюдается многократное превышение нормативных значений Co, Cu, Ni как по валовому содержанию, так и по концентрации подвижных форм. Превышение ОДК и ПДК Pb в почвах не выявлено. По мере удаления от источника воздействия снижается как общее содержание тяжелых металлов (за исключением никеля, содержание которого меняется незначительно), так и содержание подвижных форм (с 32 до 13 % по меди и никелю).

На трансекте 3 также не выявлены повышенные концентрации свинца. Общее содержание меди и никеля 3–4-кратно превышает ОДК, однако эти показатели самые низкие (на порядок) на рассмотренных точках и, по всей видимости, связаны с геохимической спецификой района исследований и длительностью функционирования Талнахской обогатительной фабрики по сравнению с другими промышленными объектами НПР. Содержание подвижных форм по отношению к общему количеству невысоко для кобальта и свинца (1–4 %) и слабо связано с расстоянием от промышленных объектов. Доля подвижных форм меди и никеля выше (6–10 %), однако также

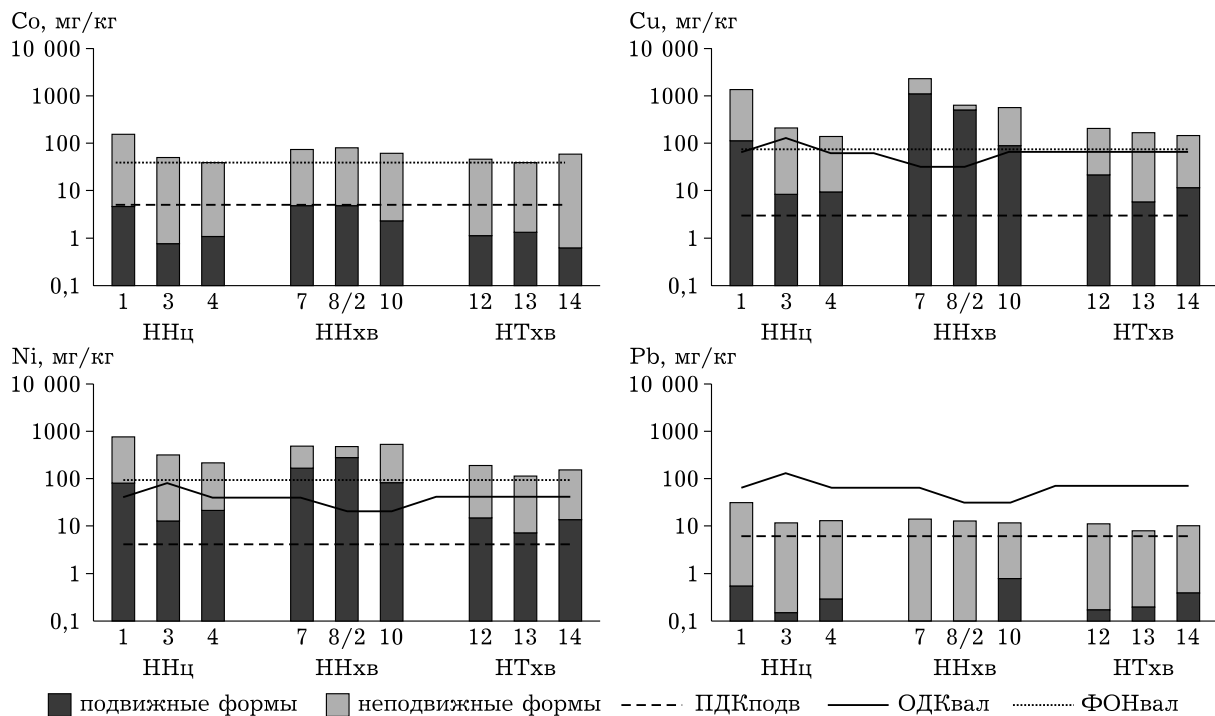


Рис. 5. Содержание различных форм тяжелых металлов в почвах трансект относительно ПДК и ОДК. вал – валовое содержание; подв – подвижная форма. Обозн. точек см. табл. 2

не зависит от расстояния до источников загрязнения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проблеме загрязнения окружающей среды ТМ и другими поллютантами уделяется в настоящее время большое внимание. Оно возрастает с ростом воздействия на нее урбанизации и индустриализации. Тяжелые металлы являются неотъемлемыми компонентами биосферы, как микроэлементы они естественным образом содержатся в почвах и растениях. Такие микроэлементы, как Zn, Cu, Mn, Ni и Co, необходимы растительным и животным организмам, другие же (Cd и Pb) обладают малоизученными биологическими функциями. При высокой концентрации в среде обитания токсичность ТМ для растений проявляется в снижении роста из-за изменений в их физиологической и биохимической активности. Кроме того, загрязняющие вещества снижают активность микроорганизмов [Thakur et al., 2022]. Аккумуляция ТМ в почвах металлоспецифична и связана с составом компонентов и свойствами почв. Органическое вещество почв сорбирует Zn, Cu и Pb; гуминовые кислоты образуют с ними нерастворимые хелаты, а фульвокислоты – напротив, водорастворимые соединения, обуславливая подвижность ТМ в органогенных горизонтах почв. Кроме того, тяжелые металлы прочно удерживаются в почве глинистыми минералами и соединениями железа [Карпучин, Ладонин, 2008]. Таким образом, вышеприведенные свойства почв способствуют аккумуляции поллютантов в верхнем органогенном горизонте, но сорбируются не всегда прочно, а образуют относительно высокое количество подвижных форм, особенно в сильнонарушенных почвах трансекты 2.

Концентрация ТМ в растениях зависит от содержания их в почве [Козыбаева и др., 2016]. Разные виды растений обладают различной способностью к концентрированию ТМ в биомассе и устойчивостью к их негативному воздействию. В зависимости от этого меняются состав и состояние растительных сообществ в зонах воздействия источников загрязнения. Геоботанические исследования показали, что под влиянием загрязнения речных систем ТМ происходит снижение бета-разнообразия, синтетических характеристик при-

брежных фитоценозов (альфа-разнообразия, общего проективного покрытия, высоты травостоя) и надземной фитомассы доминантов [Бактыбаева и др., 2011].

Для выявления степени влияния основных факторов антропогенного воздействия на состояние фитоценозов полученные данные аналитических исследований и параметры растительных сообществ были подвергнуты статистической обработке методом главных компонент. Полученные результаты показали, что первая компонента имеет наиболее тесную положительную связь с валовым содержанием и концентрациями подвижных форм Cu, Ni и Co (табл. 3). Из числа показателей, отражающих состояние растительных сообществ, первая главная компонента имеет сильную связь со степенью антропогенной трансформации фитоценозов и отрицательно коррелирует с общим числом видов. Вторая компонента имеет выраженную положительную связь с числом видов, устойчивых к антропогенному воздействию; в меньшей степени с ней связаны значения емкости катионного обмена. Также вторая компонента имеет отрицательную связь с содержанием органического углерода и концентрацией подвижного Pb. Третья компонента тесно коррелирует с концентрацией pH почвенной суспензии, концентрацией подвижных форм Pb и в меньшей степени числом видов, устойчивых к антропогенному стрессу.

Расположение участков в пространстве двух главных компонент (рис. 6) демонстрирует обособленность областей исследуемых трансект. В области положительных значений находятся участки трансекты 2, для почв которой характерны наиболее высокие валовое содержание и концентрации подвижных форм Cu, Ni и Co, а также значения индекса САТ фитоценозов. В то же время общее число видов на участках трансекты 2 минимально: их разнообразие обеспечивается преимущественно за счет видов, устойчивых к антропогенной трансформации. Полностью в области отрицательных значений по отношению к первой главной компоненте находятся участки трансекты 3. Почвам этих участков свойственны минимальные значения валовых и подвижных форм исследуемых элементов, а в относительно более богатом составе фитоценозов доля видов, устойчивых к загрязнению,

Корреляционная связь главных компонент свойств почв и показателей, отражающих состояние фитоценозов

Показатель	Компонента 1 (42,2 % дисперсии)	Компонента 2 (13,8 % дисперсии)	Компонента 3 (12,3 % дисперсии)
ФГ	-0,47	0,19	-0,12
pH _{KCl}	-0,40	0,19	0,63
C _{орг}	-0,14	-0,77	0,44
ЕКО	-0,29	0,57	-0,14
Со _{вал}	0,64	0,37	0,41
Cu _{вал}	0,92	0,09	-0,14
Ni _{вал}	0,84	-0,01	0,30
Pb _{вал}	0,62	0,46	0,42
Со _{подв}	0,86	-0,02	0,16
Cu _{подв}	0,88	0,02	-0,32
Ni _{подв}	0,79	-0,05	-0,07
Pb _{подв}	-0,06	-0,53	0,61
ЧВ	-0,82	0,28	0,06
АВ	-0,38	0,59	0,50
САТ	0,75	0,12	0,07
$p < 0,001$ при $n = 18$			Сильная корреляционная зависимость
$p < 0,01$ при $n = 18$			Средняя корреляционная зависимость
$p < 0,05$ при $n = 18$			Слабая корреляционная зависимость

П р и м е ч а н и е. ФГ – доля фракции <0,01 мм; C_{орг} – содержание органического углерода; ЕКО – емкость катионного обмена почв; Со_{вал} – валовое содержание Со; Со_{подв} – концентрация подвижной формы Со; ЧВ – общее число видов; АВ – количество синантропных видов, устойчивых к антропогенной трансформации; САТ – степень антропогенной трансформации фитоценоза.

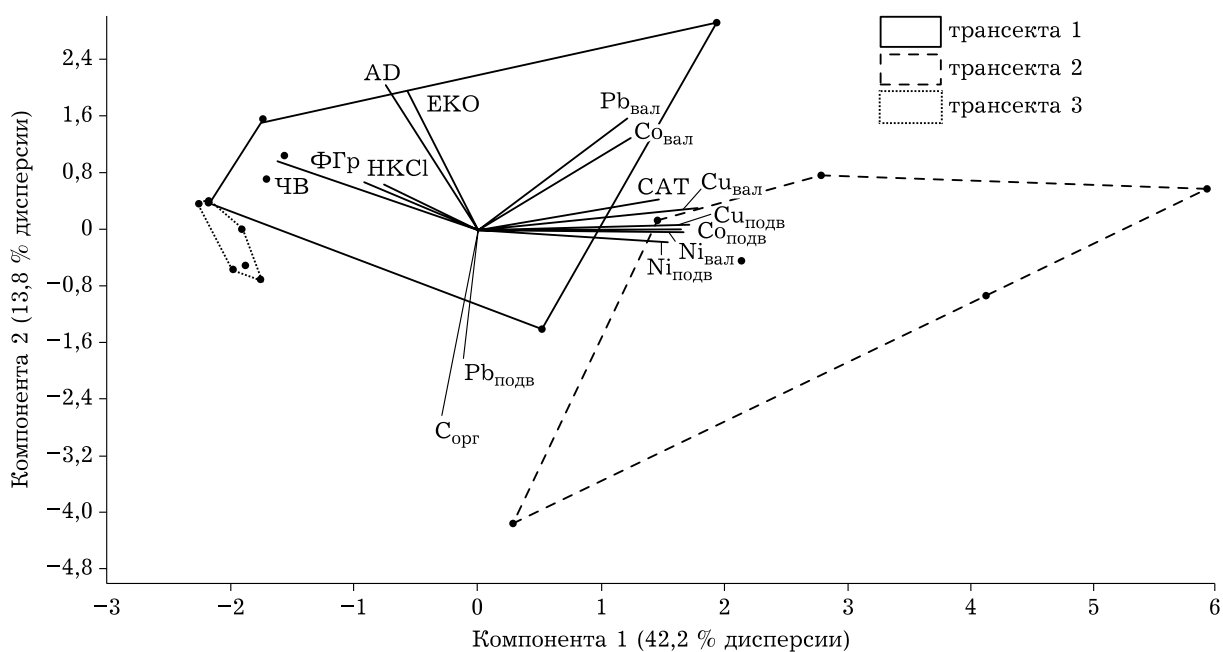


Рис. 6. Распределение объектов исследований в пространстве двух главных компонент

минимальна. Характерной особенностью этой области является небольшая площадь, что одновременно свидетельствует как о схожести фитоценозов, так и об однородности эдафических условий произрастания растений.

Участки трансекты 1 в пространстве двух главных компонент (см. рис. 6) одновременно находятся и в области положительных, и в области отрицательных значений, поскольку по концентрациям Co , Ni и Cu в почвах занимают промежуточную позицию по отношению к участкам двух других трансект. То же можно сказать и об общем числе видов растений, разнообразие которых более чем наполовину обеспечивается за счет видов, устойчивых к антропогенному стрессу.

Таким образом, на разных экологических трансектах НПП характер антропогенного влияния и степень его проявления неодинаковы. Наибольшее влияние на состав и степень трансформации растительности и почв оказывает пылеаэрозольное загрязнение вкупе с контактным химическим загрязнением. При этом степень влияния только воздушного загрязнения, очевидно, связана как с длительностью воздействия, так и с уровнем контроля за состоянием объектов размещения отходов и внедрением новых технологий их строительства. Восстановление разнообразия фитоценозов возможно только при снижении воздействия на растительность выбросов оксида серы. Этому должна поспособствовать запущенная в 2023 г. “Серная программа” ГМК “Норильский никель” – экологическая инициатива, предполагающая снижение выбросов диоксида серы на 45 %. Влияние механической трансформации проявляется только в непосредственной близости от промышленных объектов и не приводит к катастрофическому снижению фиторазнообразия.

ВЫВОДЫ

1. В Норильском промышленном районе уровень техногенного влияния предприятий на наземные экосистемы, состояние почв и растений различен и проявляется как в прямом (механическая трансформация почв), так и косвенном (пылеаэрозольное загрязнение) воздействии на них.

2. Одним из основных факторов, влияющих на состав и структуру растительного покрова,

является пылеаэрозольное загрязнение, отличающееся масштабностью и высокой степенью негативного воздействия. Влияние данного фактора зафиксировано на всех трансектах, на двух из которых отмечены наибольшие значения показателя степени антропогенной трансформации растительности (0,5–1).

3. Воздушное загрязнение в целом сильнее влияет на состав и структуру растительного покрова, в меньшей степени – на строение профилей почв, поскольку они более консервативные природные объекты. В то же время аналитические данные объективно показывают накопление ТМ (Cu , Ni и Co) в почвах и деградацию их органогенных горизонтов.

4. Наиболее негативное влияние отмечается на участках, где на пылеаэрозольное загрязнение накладывается контактное химическое загрязнение, что проявляется в ухудшении свойств почв посредством повышения подвижности Cu , Ni и Co , облегчения грансостава, подкисления реакции почвенного раствора. Фактор контактного техногенного воздействия (трансекта 2) приводит к изменению строения профилей почв, что выражается в формировании наносных (техногенных) горизонтов.

5. Фактор механической трансформации (трансекта 3) оказывает заметное воздействие как на растительность, так и на почвы. В верхней части почвенного профиля выделяется турбированный горизонт, состоящий из хаотичной смеси органического материала и каменистых обломков. Тем не менее содержание ТМ на данной трансекте не превышает показатели, соответствующие геохимическому фону района исследований. Растительность в местах механической трансформации представлена стадиями зарастания, в ней преобладают синантропные (антропогенные) виды растений. Восстановление растительности и почв начинается сразу после прекращения механического воздействия.

6. Восстановление почвенно-растительного покрова при техногенном загрязнении окружающей среды возможно при минимизации выбросов оксидов серы в воздухе (чему должна поспособствовать разрабатываемая “серная программа”) и соблюдении правил эксплуатации хвостохранилищ.

Вклад авторов

Авторы внесли равнозначный вклад в написание статьи.

Финансирование

Исследование выполнено по темам государственных заданий Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (проект АААА-А21-121011290026-9) и Института почвоведения и агрохимии СО РАН (№ 121031700316-9 и 121031700309-1). Работы проведены в рамках масштабного 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

- Бактыбаева З. Б., Ямалов С. М., Суюндуков Я. Т. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на растительные сообщества реки Таналык (Башкирское Зауралье) // *Экология*. 2011. № 5. С. 351–354. [Baktybaeva Z. B., Yamalov S. M., Suyundukov Ya. T. Effect of heavy metal pollution on plant communities of the Tanalyk river, the Bashkir Transural region // *Russian Journal of Ecology*. 2011. Vol. 42, N 5. P. 378–381. (In Russ.)]
- Вальтер Г. Общая геоботаника. М.: Мир, 1982. 264 с.
- Васильева Н. П., Гитарский М. Л., Карабань Р. Т., Назаров И. М. Мониторинг повреждаемых загрязняющими веществами лесных экосистем России // *Лесоведение*. 2000. № 1. С. 23–31.
- Васильевская В. Д. Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: Наука, 1980. 235 с.
- Водяницкий Ю. Н., Васильев А. А., Савичев А. Т., Чашин А. Н. Влияние техногенных и природных факторов на содержание тяжелых металлов в почвах Среднего Предуралья (г. Чусовой и его окрестности) // *Почвоведение*. 2010. № 9. С. 1089–1099. [Vodyanitskii Yu. N., Vasil'ev A. A., Savichev A. T., Chashchin A. N. The influence of technogenic and natural factors on the content of heavy metals in soils of the Middle Cisurals region: the town of Chusovoi and its suburbs // *Eur. Soil Sci.* 2010. Vol. 43, N 9. P. 1011–1021. (In Russ.)]
- ГОСТ 17.5.4.02-84. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО.
- ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества”.
- ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО.
- ГОСТ ISO 22036-2014. Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы (ИСП-АЭС).
- Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Корнейкова М. В. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия газозвоздушных выбросов комбината Печенганикель // *Почвоведение*. 2014. № 5. С. 625–631. [Evdokimova G. A., Mozgova N. P., Korneikova 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.)]
- Ермолов Ю. В., Лебедева М. А., Бондарь М. Г., Колпашчиков Л. А., Черевко А. С., Смоленцев Н. Б. Особенности аккумуляирования химических элементов в биогеохимической пищевой цепи северной части Норильского плато // *Геохимия*. 2020. Т. 65, № 5. С. 499–510. [Ermolov Yu. V., Lebedeva M. A., Bondar' M. G., Kolpashchikov L. A., Cherevko A. S. Accumulation of Chemical Elements in the Biochemical Food Chain of the Northern Norilsk Plateau // *Geochem. Internat.* 2020. Vol. 58, N 5. P. 562–573. (In Russ.)]
- Ермолов Ю. В., Махатков И. Д., Черевко А. С. Вклад выбросов металлургии в пылеаэрозольное загрязнение Норильского промышленного района по снегогеохимическим данным // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36, № 2 (409). С. 93–99. [Ermolov Yu. V., Makhatkov I. D., Cherevko A. S. Contribution of Metal Industry Emissions to Dust Aerosol Pollution of the Norilsk Industrial District According to Snow Geochemical Data // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023. Vol. 36, N 4. P. 306–313. (In Russ.)]
- Ершов Ю. И. Почвы Среднесибирского плоскогорья. Красноярск, 2004. 86 с.
- Игнатов М. С., Афонина О. М., Игнатова Е. А. и др. Список мхов Восточной Европы и Северной Азии // *Arctoa*. 2006. Т. 15. С. 1–130.
- Карпукхин М. М., Ладонин Д. В. Влияние компонентов почвы на поглощение тяжелых металлов в условиях техногенного загрязнения // *Почвоведение*. 2008. № 11. С. 1388–1398. [Karpukhin M. M., Ladonin D. V. Effect of soil components on the adsorption of heavy metals under technogenic contamination // *Eur. Soil Sci.* 2008. Vol. 41, N 11. P. 1228–1237. (In Russ.)]
- Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: АН СССР, 1958. 192 с.
- Козыбаева Ф. Е., Беисеева Г. Б., Даутбаева К. А. Загрязнение почвогрунтов и растений рекультивированных участков и влияние тяжелых металлов на почвенные микроартроподы // *Почвоведение и агрохимия*. 2016. № 1. С. 43–54.
- Кравцова В. И., Железный О. М. Динамика растительности Норильского промышленного района под влиянием аэротехногенных и природных факторов // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2022. Т. 28, № 1. С. 325–345.
- Лавренко Е. М., Корчагина А. А. Полевая геоботаника. Т. 3. М.-Л.: Наука, 1964. 530 с.
- Ладонин Д. В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2016. 42 с.
- Полевой определитель почв России. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2008. 182 с.
- РД 52.18.289-90. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома и марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом.
- Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению

- безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Постановление Роспотребнадзора от 28 января 2021 г. № 2.
- Секретарева Н. А. Сосудистые растения Российской Арктики и сопредельных территорий. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2004. 131 с.
- Сеньков А. А. Особенности почвенного покрова подгольцового пояса плато // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 6. С. 845–854. [Senkov A. A. Peculiarities of soil cover in the subalpine belt of the Putorana plateau // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7, N 6. P. 628–635. (In Russ.)]
- Соколов И. А. Особенности автономного полярно-бореального почвообразования на основных породах (плато Путорана) // Почвы и растительность мерзлотных районов. Магадан, 1973. С. 42–47.
- Сысо А. И., Соколов Д. А., Сиромля Т. И., Ермолов Ю. В., Махатков И. Д. Антропогенная трансформация свойств почв ландшафтов Таймыра // Почвоведение. 2022. № 5. С. 521–537. [Syso A. I., Sokolov D. A., Siromlya T. I., Ermolov Yu. V., Makhatkov I. D. Anthropogenic transformation of soil properties in Taimyr landscapes // Eur. Soil Sci. 2022. Vol. 55, N 5. P. 541–555. (In Russ.)]
- Телятников М. Ю., Пристяжнюк С. А. Антропогенное влияние предприятий норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 6. С. 903–922. [Telyatnikov M. Yu., Pristyazhnyuk S. A. Anthropogenous influence of Norilsk industrial area on plant vegetation cover of the tundra and forest tundra // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7, N 6. P. 654–668. (In Russ.)].
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Изд-во “Ойкумена”, 2004. 341 с.
- Яковлев А. С., Плеханова И. О., Кудряшов С. В., Аймалетдинов Р. А. Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности предприятий металлургической компании “Норильский Никель” // Почвоведение. 2008. № 6. С. 737–750. [Yakovlev A. S., Plekhanova I. O., Kudryashov S. V., Aimaletdinov R. A. Assessment and regulation of the ecological state of soils in the impact zone of mining and metallurgical enterprises of Norilsk nickel company // Eur. Soil Sci. 2008. Vol. 41, N 6. P. 648–659. (In Russ.)]
- Esslinger T. L. A cumulative checklist for the lichen-forming, lichenicolous and allied fungi of the Continental United States and Canada, Version 21 // Opuscula Philolichenum. 2016. Vol. 15. P. 136–390.
- Hennekens S. M. MEGATAB a visual editor for phytosociological tables. Uift, 1996. 11 p.
- Hill M. O. DECORANA and TWINSpan, for ordination and classification of multivariate species data: a new edition, together with supporting programs, in FORTRAN 77. Huntingdon: Institute of Terrestrial Ecology, 1979. 58 p.
- Thakur Risikesh, Sarvade S., Dwivedi B. S. Heavy Metals: Soil Contamination and Its Remediation // Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews Journal. 2022. Vol. 10, N 2. P. 59–76.

The influence of enterprises of the Norilsk industrial district on vegetation and soils (using the example of three ecological transects)

N. A. SOKOLOVA¹, M. YU. TELYATNIKOV², A. I. SYSO¹, A. N. BESPALOV¹, D. A. SOKOLOV¹

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS
8/2, Akademika Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: nsokolova@issa-siberia.ru*

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

The specifics of Norilsk industrial district (NID) soils are abnormally high natural concentrations of heavy metals (HM), in particular Ni and Cu. In such conditions, the additional intake of pollutants into soils with high acidity reduces the stability of soil microflora, and increases the risks of vegetation death. In previous decades, the negative impact of dust and aerosol emissions from industrial enterprises of the NID containing SO₂, Ni and Cu on the state of soils and the accumulation of HM in vegetation was revealed. The purpose of this study is to assess the current state of soils and vegetation within the impact zones of enterprises of the NID of various types and to identify the degree of their influence. Using the example of three environmental transects, the impact of prolonged aerosol dust and single contact chemical pollution, as well as mechanical transformation in the construction area of industrial facilities, is estimated. The effect of dust and aerosol pollution was recorded on all transects, two of which showed the highest values of the degree of anthropogenic transformation of vegetation (0.5–1). The most negative impact is observed in areas where contact chemical contamination is superimposed on dust and aerosol pollution. The factor of contact chemical impact, in addition to changing the substantial composition and properties, leads to a change in soil profiles. The factor of mechanical transformation has a noticeable effect on both the composition of phytocenoses and the soil profile. At the same time, the content of HM in this transect does not exceed the values corresponding to the geochemical background. The restoration of vegetation and soils in such areas begins immediately after the ending of mechanical action.

Key words: dust and aerosol pollution, heavy metals, degree of anthropogenic transformation, Cryosols, structure of phytocenoses.